

Mémoire de Fin d'Etudes (MFE)

Variabilité temporelle du biote des sols sous palmiers à huile  
après applications de résidus de récolte

En vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur de l'ISA



Professeur tuteur : M. ANDRIANARISOA Kasaina Sitraka

Maitre de stage : M. CARRON Marc-Philippe



Institut Supérieur d'Agriculture  
48 boulevard Vauban  
59046 Cedex Lille



CIRAD  
Avenue Agropolis  
34398 Montpellier Cedex 5

Mémoire de Fin d'Études (MFE)

## Variabilité temporelle du biote des sols sous palmiers à huile après application de résidus de récolte

En vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur de l'ISA



Professeur tuteur : ANDRIANARISOA Kasaina Sitraka

Maitre de stage : CARRON Marc-Philippe

PIERRAT Mélodie

Promotion 46

Février – Août 2013

## Résumé

---

Les rafles, résidus de récolte issus de l'extraction de l'huile de palme, sont rapportées dans les palmeraies en substitution partielle des engrais minéraux. Cette étude s'intéresse à l'impact de ces intrants organiques sur la faune du sol, ainsi que sur les caractéristiques physico-chimiques associées, dans le but de fournir les premières bases à la construction de référentiels sur la zone.

L'étude caractérise la variabilité temporelle des caractéristiques du sol sous les rafles entre deux applications espacées de deux ans. Elle se déroule en Indonésie dans la province de Riau au sein du centre de recherche de Smart-RI situé à Libo. Une chronoséquence à 6 modalités est construite en tenant compte de la date entre l'apport des rafles et celle du prélèvement des échantillons : 1, 3, 6, 12, 18, 24 mois. Des parcelles sans apport de rafles servent de référence. Les caractéristiques physiques et chimiques sont analysées ainsi que la macrofaune et la nématofaune. Le sol est analysé sur une profondeur de 15 cm en distinguant la zone humifère superficielle (A0) de la partie sous-jacente (A1). Le degré de décomposition de la litière de rafles est mesuré par l'évolution de sa composition chimique et de sa biomasse.

L'horizon humifère A0 est le plus impacté par l'application de rafles, tout au long de la période étudiée. Cette concentration d'impact s'exprime sur les trois composantes et permet de mesurer des effets significatifs. L'étude conduit à identifier trois périodes. La première période révèle une forte perturbation des caractéristiques du sol pendant une période d'environ 6 mois suivant l'application des rafles. Elle se traduit par une forte augmentation du pH, des teneurs en potassium, de l'indice de saturation et de l'abondance de la macrofaune, notamment des fourmis. En revanche, les populations de vers de terre et de nématodes sont fortement réduites. Une période médiane, entre 12 et 18 mois, montre une baisse de l'abondance de la macrofaune. La dernière période, autour de 24 mois, exprime l'amélioration maximum d'un certain nombre de paramètres de la fertilité tels que densité apparente, CEC, teneurs en azote, calcium, carbone et argile entrant dans la composition du complexe argilo-humique. Cette dernière période se caractérise également par une abondance maximale en vers de terre et en diplopodes. Les communautés de nématodes sont plus abondantes sur les deux dernières périodes, plus équilibrées sur le plan fonctionnel et témoignent d'une résilience effective. Ces résultats posent de nouvelles questions relatives à la période de perturbation et aux modalités d'application des rafles.

Mots clés : Rafles, Palmier à huile, Macrofaune, Méthode TSBF, Nématofaune, résidus organiques

Keywords: EFB, Oil palm, Macrofauna, TSBF method, Nematofauna, organic waste

## Remerciements

Dans le cadre de stage de mémoire de fin d'études, je souhaite remercier :

Tout d'abord,

Mr. CARRON Marc-Philippe et Mr. SNOECK Didier, chercheurs au CIRAD au sein de l'UPR 34 « systèmes de pérennes » pour les compétences qu'ils m'ont apportées et le temps consacré à la relecture de mon rapport.

Mais également,

Mr. ANDRIANARISOA Kasaina Sitraka, mon maître de stage, pour son soutien et sa confiance.

Mr. CALIMAN Jean-Pierre, directeur des recherches au centre de recherche de SMARTRI, pour m'avoir accordé de son temps malgré un emploi du temps chargé, et pour son professionnalisme.

(Mr.) Pak SUHARDI, chercheur au centre de recherche de SMARTRI et mon encadrant en Indonésie, pour son aide tout au long de mon séjour, sa confiance et son support technique.

L'équipe de chercheurs, de managers et de techniciens de SMARTRI pour leur aide, leur bonne humeur et leur curiosité au regard du projet et de la culture française.

Mme RIBEYRE Fabienne, chercheuse statisticienne au CIRAD, pour son accompagnement tout au long de mes analyses statistiques et pour m'avoir donné goût au langage statistique.

Mme VILLENAVE Cécile, responsable scientifique au sein de ELISOL Environnement, pour l'intérêt porté au projet et l'aide dans l'interprétation des données nématodes.

Erwin, Novri et Lubis, ainsi que l'ensemble des techniciens Indonésiens ayant intervenus pour me rendre la tâche plus aisée sous ce climat tropical, pour leurs chants et leur bonne humeur.

Jeje, une rencontre inoubliable, pour m'avoir permis de découvrir cette belle culture indonésienne, sa nourriture épicée, ses fameux karaokés et ses « kretek ». Pour m'avoir enseigné les bases de la langue indonésienne et tenté de familiariser au déplacement à deux roues.

Oli et les femmes du « mess » qui m'ont préparé avec bonne humeur mon riz et poulet fris quotidiens.

Sans oublier tous les stagiaires et thésards dont j'ai croisé la route. Pour les repas partagés et les matchs de badmintons sous une chaleur écrasante ...



## 1 Introduction

---

L'huile de palme est présente dans près de 30% des produits alimentaires et représente l'une des matières premières les plus consommées au niveau mondial. Sa production a augmenté de plus d'un tiers en cinq ans en se concentrant depuis une dizaine d'année en Asie (Chenay (de La) 2012). L'Indonésie, premier producteur mondial d'huile de palme, totalisait ainsi 6,09M d'hectares en 2011 devant la Malaisie (4,23Mha).

Face à l'augmentation de la demande en corps gras des pays en voies de développement ainsi que l'intérêt grandissant pour la production de biocarburants, l'Indonésie ambitionne de produire 40 M de tonnes d'huile de palme d'ici 2020 (USDA 2012). Une augmentation des surfaces en plantations industrielles de palmiers à huile est possible mais celle-ci se fait au détriment de la forêt primaire, exposant cette culture aux vives critiques des Organisations Non Gouvernementales (ONG) (WWF 2011). Une alternative consiste à augmenter les rendements via une démarche d'intensification écologique. Il s'agit de mettre au point des systèmes de production agricole, qui utilisent de façon intensive les processus biologiques et écologiques des écosystèmes, leurs fonctionnalités naturelles, plutôt que d'utiliser de façon intensive des intrants (énergies fossiles, engrais chimiques, pesticides) (Goulet 2012).

De façon conventionnelle, les hauts rendements en palmeraies sont pilotés principalement par l'apport de fertilisants minéraux. Ces apports sont calculés sur la base d'un diagnostic foliaire ; des essais de fertilisation sur site ayant permis au préalable d'établir des correspondances entre teneurs en éléments minéraux de folioles (N, P, K, Ca, Mg) et niveaux de production (Caliman et al. 1994). Des analyses de sol sont réalisées avant la plantation du palmier et influent également sur les préconisations. Dans certaines plantations, des résidus (ou rafles) issus de la transformation des régimes de palmiers à huile sont retournés au sol en tant que fertilisants organiques, assurant un cycle des nutriments, en remplacement partiel des intrants chimiques. La nature des apports (minéraux vs organiques) est susceptible d'impacter les trois composantes de la fertilité du sol, physique, chimique et biologique.

Plusieurs études ont analysé l'impact des apports de rafles sur les composantes physiques et chimiques, la composante biologique du sol reste inconnue. Le sol est un milieu complexe où les différents organismes sont relativement interdépendants et interagissent avec les composantes physiques et chimiques. La matière organique est dégradée successivement par différents groupes d'organismes du sol, chacun possédant son propre domaine fonctionnel. Il est donc justifié de faire l'hypothèse qu'un changement dans les apports aura un impact sur le fonctionnement du sol et de son écosystème.

Cette étude se concentre sur l'impact des apports de rafles sur la composante biologique des sols, et plus particulièrement sur la biodiversité de la macrofaune et la nématofaune. Le protocole utilisé permet de mesurer l'évolution dans le temps des populations d'organismes du sol liée à la cinétique de décomposition des rafles.

La première partie présente le cadre de l'étude en présentant l'entreprise d'accueil, ses préoccupations ainsi que les différents partenaires du projet. La partie Contexte décrit l'environnement et l'état des connaissances sur le sujet. Elle permettra de poser la problématique de l'étude. La partie Matériel et Méthode développe les caractéristiques du site d'expérimentation ainsi que les méthodes d'échantillonnage et d'analyse des composantes physiques, chimiques et biologiques du sol. La partie Résultats détaille les résultats de la chronoséquence pour chaque composante de la fertilité du sol. Enfin, la partie Discussion permet de confronter ces résultats à la bibliographie et de proposer des perspectives pour de futures études.

## 2 Cadre de l'étude

---

### 2.1 Lieu d'accueil

Le **CIRAD** (Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement) est un centre de recherche public français, à caractère industriel et commercial placé sous la double tutelle du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, et du ministère des Affaires étrangères et européennes. Créé en 1984, par la fusion de différents instituts de recherche agronomique tropicale français spécialisés dans différentes productions, le CIRAD dispose dorénavant d'un réseau mondial de partenaires et de 12 directions régionales, à partir desquelles il mène des activités de coopération avec plus de 90 pays du Sud et d'autres institutions de recherche du Nord (INRA, IRD, Universités, etc.). En France, il met à la disposition de la communauté scientifique nationale et internationale, un important dispositif de recherche et de formation situé principalement à Montpellier (campus de Lavalette et de Baillarguet) et dans l'outre-mer français. Le CIRAD représente 1800 agents dont 800 chercheurs, 3 départements scientifiques : Systèmes biologiques (BIOS), Performance des systèmes de production et de transformation tropicaux (Persyst), Environnement et sociétés (ES), et 36 unités de recherche. Le siège social du CIRAD est situé à Paris. Le stage s'est déroulé sur le campus de Lavalette, situé au nord de la ville de Montpellier sur plus de 145 hectares, au sein de l'unité de recherche « Performance des systèmes de culture des plantes pérennes » (UPR34).

**L'unité de recherche « Performance des systèmes de culture des plantes pérennes »** du CIRAD est positionnée sur l'agronomie des systèmes de cultures pérennes tropicales (café, cacao, palmier à huile, cocotier et hévéa). L'équipe intervient sur trois grands bassins de production, l'Asie du Sud Est, l'Amérique du Sud et l'Afrique. Elle est composée de vingt chercheurs et ingénieurs et de deux assistantes. Seize personnes sont basées à Montpellier et six sont en détachement à l'étranger. L'unité accueille périodiquement des stagiaires. Le stage MFE a été encadré par deux chercheurs de l'UPR, Marc-Philippe CARRON et Didier SNOECK, et s'est déroulé en partenariat avec l'entreprise PT-SMART.

**PT-SMART Tbk** (PT Sinar Mas Agro Resources and Technology Tbk) est une filiale gérant toute la partie technique des plantations de Golden Agri-Resources Ltd (« GAR »), la deuxième plus grande entreprise de plantation de palmiers à huile dans le monde (Smart 2012). Ainsi, au 30 septembre 2010, l'ensemble des plantations appartenant à l'entreprise PT SMART couvrait une surface de 459,500 hectares (incluant les petits planteurs) en Indonésie. Le siège de l'entreprise est situé à Jakarta (Indonésie). SMARTRI (Sinar Mas Agribusiness Resources and Technology Research Institute) est un centre privé de recherche sur la culture du palmier à huile. Situé à Libo, dans la province de Riau, sur l'île de Sumatra en Indonésie, ce centre est formé de deux laboratoires industriels (organique et inorganique). Le centre est dirigé par un français, Jean-Pierre CALIMAN, directeur des recherches. Des étudiants indonésiens et étrangers (Australie, Angleterre, Canada, Chine, France, ...) sont en permanence accueillis pour des masters ou des thèses. L'ensemble des analyses chimiques, physiques et de macrofaune ont été réalisés dans les laboratoires du centre. Sur place, le stage a été

encadré par Monsieur Suhardi, chercheur spécialisé dans la science des vers de terre. L'échantillonnage a été réalisé avec l'aide de trois techniciens Indonésiens. Quant aux analyses nématologiques, les échantillons ont été envoyés en France dans un laboratoire privé spécialisé, ELISOL environnement.

ELISOL environnement est un laboratoire d'analyse spécialisé dans les nématodes, utilisés pour l'analyse de l'état du sol, le suivi des processus de dépollution ou de réhabilitation de sites, et l'aide à la décision pour la gestion de sites et des sols. Dirigé par Hélène CEREMONIE, le laboratoire est situé à Montpellier. L'interlocutrice principale au cours de ce stage a été Cécile Villenave, Responsable scientifique au sein de l'ELISOL. L'équipe comprend également un responsable production ainsi qu'un assistant production.

## 2.2 La stratégie de l'entreprise

Le CIRAD a pour rôle la production et la transmission de nouvelles connaissances, ainsi que la création de systèmes de culture innovants, afin de répondre aux enjeux auxquels doit faire face l'agriculture d'aujourd'hui. Il agit sur les trois piliers de la durabilité, économique, sociale et environnemental, par la définition de six axes scientifiques prioritaires qui visent : le développement des techniques d'intensification écologique visant à s'appuyer sur les processus écologiques afin de lutter contre les bioagresseurs, de réduire les nuisances, de mieux valoriser les ressources rares et d'améliorer les services écologiques (stockage du carbone, diversité biologique, etc.) ; la possibilité de développement de bioénergie en faveur des sociétés du Sud ; l'accessibilité et la qualité des ressources alimentaires disponibles ; l'anticipation et la gestion des risques sanitaires infectieux liés aux animaux sauvages et domestiques ; l'accompagnement des politiques publiques dans le but de réduire les inégalités et la pauvreté ; une gestion durable des territoires par une meilleure prise en compte de l'environnement liée à la pratique de l'agriculture ainsi qu'une meilleure compréhension des relations entre la société et l'environnement.

L'unité propre de recherche (UPR) « Performance des systèmes de culture des plantes pérennes » a pour particularité l'importance accordée à l'expertise des systèmes de culture (1/3 des équivalents temps plein), avec une vision très « agronomie générale », en plus de la partie recherche et ingénierie. Un changement progressif est cependant en train de s'opérer au sein de cette unité depuis une dizaine d'année par l'évaluation des impacts environnementaux de ces cultures. Cette évolution a été encouragée par le rapport d'évaluation de l'AERES (Agence d'Évaluation de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur) (aeres 2010). Cette évolution entraîne une intensification des activités de recherche dans le domaine de l'environnement. Une vision large de la complexité des agro-écosystèmes est envisagée par l'UPR, entraînant un besoin de recherche pour l'adaptation des outils d'évaluation environnementale et pour accompagner un changement d'échelle des concepts de l'agroécologie. Le projet de l'UPR vise dorénavant à développer des stratégies d'intensification écologique sur les systèmes de pérennes tropicaux, par la conception de systèmes de production durables, économes en intrants pour une meilleure préservation de l'environnement. L'échelle d'étude va de l'arbre au territoire, en passant par la parcelle et l'exploitation.

Dans le domaine qui concerne le sujet abordé au cours du stage, la stratégie est de tendre vers une approche holistique du sol, de la nutrition du peuplement et de la production. Les recherches sont destinées à construire les bases scientifiques d'aide à la décision (méthodes analytiques, données de références, indicateurs/bioindicateurs, etc.) face à la grande variabilité des pratiques de fertilisation sur les systèmes de pérennes tropicaux, et faire face aux initiatives diverses en matière de recyclage des résidus organiques. Elles seront utilisées à l'échelle de la parcelle pour la définition de systèmes de culture ou à l'échelle du territoire ou de la filière pour des analyses de cycles de vie (ACV).

Pour réaliser ses recherches, l'UPR développe de nombreux partenariats publics et privés, du Nord et du Sud (bailleurs de fonds, organismes de recherche, petits producteurs et agro-industries). Le sujet développé ici est traité dans les plantations industrielles de palmiers à huile du géant indonésien PT SMART ; partenariat portant sur un financement partiel, la disponibilité de terrains expérimentaux et l'appui d'une structure de recherche locale. Malgré son entrée au sein de la RSPO (Roundtable on Sustainable Palm Oil : table ronde sur l'huile de palme durable) créée en 2003, PT SMART est à ce jour soumis à des pressions sociétales de la part des ONG concernant deux des trois piliers de la durabilité, l'environnement et le social (Greenpeace 2010; WWF 2011). La stratégie de la compagnie est de ce fait d'adopter toutes mesures et pratiques agri-environnementales ayant été éprouvées, et de faire des recherches et tests concernant celles à confirmer, en collaboration avec d'autres acteurs de la filière et des instituts de recherche, tel que le CIRAD (Caliman 2011).

Le laboratoire Elisol-Environnement (Montpellier, France), intervient comme prestataire pour l'analyse des communautés de nématodes.

### **2.3 La préoccupation de l'entreprise**

Historiquement, l'objectif appliqué de l'Unité est de dispenser des connaissances et recommander des pratiques permettant d'optimiser la production, la valorisation de l'activité des producteurs et la sécurisation des revenus des populations rurales (CIRAD 2009). Aujourd'hui, le projet de l'Unité « Système de Pérennes » tend vers une production durable des écosystèmes tropicaux en respectant les trois piliers de la durabilité, économique, sociale et environnemental. Les pratiques évoluent partout dans le monde face à l'augmentation des prix des engrais chimiques, à la nécessité de valoriser les résidus organiques, à la perte de fertilité de certains territoires. L'unité se doit d'apporter des solutions à la question de l'évaluation ou du suivi de la fertilité globale des sols sous les systèmes de pérennes tropicaux. En cela elle accompagne un effort de recherche national (ADEME) et international sur cette question très actuelle.

### 3 Contexte et problématique

---

En zone tropicale humide, les systèmes de production à base de cultures pérennes font partie des solutions de lutte contre la pauvreté et de reconstitution partielle des systèmes forestiers (cirad 2013).

La **culture du palmier à huile** est un modèle d'étude particulièrement intéressant grâce à la convergence des **questionnements de nature sociétale**, agronomique et environnementale. En Indonésie en 2009, 40 % de la surface en plantation de palmiers à huile appartenait à des petits producteurs (moins de 25 ha) du fait des hauts rendements largement supérieurs à ceux des cultures traditionnelles progressivement remplacées (hévéa, rizières), leur permettant d'accéder à un échelon social supérieur (WWF 2011). Sa culture demande également une main d'œuvre importante, 30 fois plus d'emplois générés par unité de surface que les autres grandes exploitations agricoles comme le soja (CNUCED 2012), et permettait en 2009 à 15 à 20 millions d'Indonésiens de vivre de l'industrie du palmier à huile. D'un point de vue agronomique, l'huile de palme possède des rendements records (4t/ha d'huile contre 0,8t/ha pour le soja ou le colza), d'où une meilleure valorisation de l'hectare occupé (6 fois mieux que le soja) et des coûts de production plus faibles que les autres oléagineux (CNUCED 2012). Du fait des très forts rendements, de la demande mondiale soutenue en corps gras et de la disponibilité en terres, la culture du palmier à huile s'est très vite répandue en Asie du sud-est. Ainsi, l'huile de palme est devenue la première huile produite dans le monde (1/3 de la production totale), devant le soja, avec 47,9Mt produites en 2010-2011, dont 49 % en Indonésie et 38 % en Malaisie. Ces deux pays assurent ainsi 90 % des exportations mondiales (USDA 2012).

La culture du palmier à huile pose de nombreuses **questions agronomiques**, notamment concernant le statut nutritionnel du peuplement (N, P, K, Mg). Celui-ci est évalué par l'intermédiaire de diagnostics foliaires corrélés à la production via la fertilisation. L'augmentation des prix des engrais chimiques, la raréfaction de certaines ressources (phosphore, P), ainsi que le développement des pratiques de recyclage des résidus d'usine, font émerger une notion d'optimisation économique et environnementale de la fertilisation organique et minérale. Des outils de diagnostic et des indicateurs doivent être définis pour mesurer l'impact des pratiques et des systèmes de culture sur la fertilité des sols.

Les **préoccupations environnementales** se sont accentuées au cours des dernières décennies avec des causes telles que la déforestation et la disparition des grands mammifères. Aujourd'hui, avec l'augmentation de la population mondiale et la prise de conscience de la dégradation des sols causée par les pratiques d'agriculture intensive du XXe s, les préoccupations se tournent vers la préservation du capital « sol » (Bispo et al. 2012b). La définition de la **qualité des sols** évolue en lien avec ces préoccupations. On considère aujourd'hui qu'il s'agit de la capacité d'un sol à être fonctionnel, à l'intérieur des limites imposées par l'écosystème et l'utilisation des terres, dans le but de préserver la productivité biologique et la qualité environnementale, et de promouvoir la santé des plantes, des animaux et de l'homme (Adeboye et al. 2011). Encore à l'heure actuelle, l'évaluation de cette qualité est basée sur des indicateurs environnementaux physiques et chimiques (Feix et al. 2012). Le développement de **paramètres biologiques** permettrait de

prendre en compte toute la complexité du sol et notamment les différents rôles fonctionnels remplis par les organismes du sol. (Ruiz et al. 2008) ont listé les principaux processus écologiques incluant la faune du sol ; entre autres, le cycle de l'azote, la fixation de l'azote, le contrôle des maladies et ravageurs des cultures, la décomposition de la matière organique, la séquestration du carbone, la maintenance de la structure du sol ou bien encore la détoxification du sol. Basé sur ces processus, les organismes du sol sont classés en groupes fonctionnels: les ingénieurs chimiques permettent le recyclage des nutriments et la fixation d'azote (microorganismes), les microrégulateurs régulent les populations microbiennes (microfaune), les décomposeurs s'attaquent à la matière organique (mésafaune) et les ingénieurs du sol (ou de l'écosystème) affectent la structure du sol (macrofaune) (Blanchart 2012). Grâce à l'éventail de rôles rempli par la faune du sol, le maintien de la biodiversité du sol (diversité des êtres vivants et des écosystèmes), via la promotion de la diversité et de l'activité de ces organismes, permet une meilleure résistance et résilience aux modifications du milieu (Bispo et al. 2012a).

Afin d'aider à la compréhension du fonctionnement du sol, la tendance actuelle est à la recherche d'**indicateurs biologiques** (ou bioindicateurs) correspondant à des propriétés mesurables du sol (Blanchart 2012). La difficulté réside dans la grande richesse spécifique présente dans les sols. Un quart des espèces vivantes décrites aujourd'hui sont des animaux du sol (Marsden 2013). Jusqu'à 150.000 « individus » de microarthropodes peuvent être retrouvés par mètre carré de forêt mixte, et jusqu'à plusieurs millions de nématodes (Rutgers et al. 2009). En outre, seule une faible proportion de la biodiversité des sols est connue, d'où l'appellation de troisième frontière biotique (Jeffery et al. 2010). Les premiers bioindicateurs développés correspondent aux communautés de lombrics et à la biomasse microbienne du fait de leur sensibilité aux modifications des systèmes agricoles. Les différents groupes écologiques de vers de terre (épigés, endogés et anéciques) sont pris en compte séparément via les impacts différents occasionnés sur le sol et leurs habitudes alimentaires (saprophages, saprogéophages, géophages) (Lavelle et al. 1998). D'autres paramètres biologiques sont susceptibles prochainement de faire partie de l'éventail de bioindicateurs, notamment les communautés de nématodes (abondance et indices nématologiques), de microorganismes (grâce au développement des méthodes moléculaires) et des activités enzymatiques impliquées dans les cycles biogéochimiques (Bispo et al. 2012b). Les indices nématologiques (entre autres EI : Indice d'Enrichissement et SI : Indice de Structure) permettent de caractériser différentes classes de sol en fonction du niveau de perturbation, d'enrichissement et de contrôle (sol conducteur ou suppressif) (Ferris et al. 2001).

Les résidus organiques sont considérés comme **source de nourriture** pour les organismes du sol (Lavelle et al. 2001), à l'origine du maintien de la biodiversité dans les écosystèmes terrestres (Bispo et al. 2012b). La reconstitution du pool de matière organique du sol est un processus lent. Face à l'intensification des pratiques culturales en vue de nourrir la population croissante, le développement de nouvelles techniques de culture est à l'origine de la diminution du pool de carbone organique des sols (ex : changement d'affectation des sols) (fem 2012). Dans le but de guider les pratiques agricoles afin de développer des itinéraires techniques

favorisant la biodiversité, il est nécessaire d'évaluer l'impact de l'apport de matière organique sur les organismes du sol.

Des **variations** dans le temps de la faune du sol ont pu être observées, en fonction du système de culture, des pratiques culturales ou des modifications de l'environnement (Chaussod 1996). Peu de travaux relatant directement des variations temporelles des populations de macrofaune et nématodes au cours du processus de décomposition d'un paillis ont été trouvés. Associé à cela, l'hétérogénéité de distribution avec des variations spatiales des populations, a été démontré par (Jimenez et al. 2011) pour différentes espèces de vers de terre dans une forêt galerie des llanos de Colombie. Les variations spatio-temporelles des paramètres biologiques montrent la nécessité de travailler à l'acquisition de référentiels construits dans différents contextes paysagers. L'étude de ce rapport se concentrera sur le système de culture palmier à huile.

Une **première étude** menée dans le système palmier à huile en 2012 (Auriac 2012) s'est focalisée sur la variabilité spatiale du biote des sols (macrofaune, nématofaune et microorganismes) dans des parcelles avec ou sans apports organiques. Un premier constat concerne la présence de niches écologiques (place occupée par une espèce dans un écosystème) et la création de nouvelles, influencées par les pratiques de fertilisation. Ces niches font apparaître une variabilité au niveau des groupes taxonomiques (genre, famille) et des groupes fonctionnels, tant au niveau de la macrofaune que de la nématofaune. La macrofaune est analysée en termes d'abondance (nombre d'individus), de biomasse (grammes), de diversité et richesse taxonomique (différents taxons et nombre d'individus retrouvés dans chaque taxon). La nématofaune est analysée en fonction de l'abondance totale et des indices nématofauniques.

<p>L'étude décrite ici, fait suite à la précédente, en se concentrant sur la variabilité temporelle du biote des sols sous culture de palmiers à huile en lien avec l'application de résidus organiques d'usine.</p>
--



**Le palmier à huile** (*Elaeis guineensis* Jacq.) est une monocotylédone vivace de la famille des *Arecaceae* qui croît toute sa vie en hauteur par son bourgeon terminal. La limite d'exploitation de cette culture est cependant d'environ 25 ans pour des raisons de difficultés de récolte du fait de la hauteur de l'arbre (Ferrand 1947). Le palmier à huile commence à produire entre 2 et 5 ans. Plusieurs récoltes sont réalisées par an avec une production moyenne de 15 à 25 t de régimes par hectare, (soit 3 à 6 tonnes d'huile de palme) (USDA 2012). Le palmier est une plante hermaphrodite monoïque ce qui signifie que chacune de ses inflorescences est unisexuée avec succession dans le temps et dans l'espace d'inflorescences mâles et femelles, ces dernières donneront les régimes après fécondation. À maturité, le régime est composé d'une masse compacte, ovoïde de 2 à 50kg, portant de 500 à 3000 fruits. Les fruits, de 2 à 5 cm de long, contiennent de l'huile de palme dans le mésocarpe et de l'huile de palmiste à partir de l'amande. Le système racinaire fasciculé du palmier à huile est principalement localisé dans les 50 premiers centimètres de sol mais peut descendre jusqu'à une profondeur de 6m (Hornus 2009).

Originaire d'Afrique de l'Ouest, les palmiers à huile poussent pleinement en Asie du sud-est (notamment Malaisie et Indonésie), grâce à deux facteurs climatiques essentiels, des précipitations importantes et une luminosité élevée. De plus, la présence de sols argileux à argilo-sableux riches en éléments nutritifs et matière organique nécessaires à son bon développement, se retrouvaient facilement dans des sols de forêts primaires rencontrées en pays tropicaux (Ferrand 1947).

Pendant la phase d'exploitation, les hauts rendements sont pilotés essentiellement par l'apport de fertilisants minéraux qui représentent un poste budgétaire significatif. La fertilisation chimique, dans les parcelles en production industrielle, est basée sur la réalisation, tous les deux ans, d'une analyse foliaire dans le but de déterminer les besoins de la plante (Caliman et al. 1994). Ces apports dépendent également de l'analyse de sol réalisée au moment de la plantation des palmiers à huile dans le but de comprendre les caractéristiques du sol (texture, taux de matière organique) (Caliman 2013). Depuis quelques années, des apports organiques viennent s'ajouter à la fertilisation chimique. Il s'agit de rafles (Empty Fruit Bunch, EFB), l'un des principaux coproduit obtenu après extraction d'huile de palme des régimes (Fresh Fruit Bunch, FFB) récoltés sur les palmiers à huile. Environ 2,2 à 2,4 tonnes de rafles sont produites après l'usinage de 10 tonnes de FFB (Caliman 2013).

Pendant de nombreuses années, ces résidus étaient brûlés et les cendres épandues sur les parcelles. Ce procédé permettait à la fois la fourniture d'énergie pour le fonctionnement des chaudières de l'usine, et les cendres représentaient une source d'engrais riche en potasse ( $K_2O$ ) (Lim and Zaharah 2000). Mais la prise en compte des **pollutions atmosphériques** par le Malaysian quality air regulation de 1978 a conduit à la recherche d'alternatives à l'incinération de déchets industriels (Abu Bakar et al. 2011) : premier niveau de prise en compte des impacts environnementaux. C'est en 1979 que l'épandage de rafles comme paillis au pied des palmiers sur les parcelles les plus proches des usines d'extraction d'huile a commencé (Gurmit et al. 1981). À l'inverse des dépôts simples, le paillage apporte la matière organique en quantité maîtrisée pour assurer le bon développement de la plante, et participe également à l'amélioration des propriétés du sol (Singh

et al. 1999). Les rafles sont riches en potassium et autres éléments minéraux ; 80 kg de rafles correspondant à 1 kg de chlorure de potassium (KCl) (Hornus and Nguimjeu 1992). Elles sont apportées à des doses variant de 40 à 90 tonnes par hectare, normalement une fois tous les deux ans. L'apport de rafles est considéré comme un engrais organique qui permet d'effectuer des économies sur les engrais chimiques (Singh et al. 1999). Cette pratique est en outre susceptible d'améliorer la qualité des sols et de **réduire les pollutions par les engrais minéraux** : deuxième niveau de prise en compte de l'impact environnemental des pratiques culturales.

Différentes études ont été menées dans le but de comprendre la cinétique de **dégradation des rafles** sous forme de paillis apporté au sol. Elle dépend de la composition de cette matière organique. (Saletes et al. 2004) ont montré que la rafle était formée de deux composants principaux : la cellulose (46 %) et la lignine (16,5 %), qui sont responsables d'un ratio C/N élevé compris entre 45 et 70. Les pourcentages et ratios divergent entre les auteurs ; ces différences sont peut-être à l'origine des vitesses de décomposition différentes évoquées dans les articles. D'après (Lim et. Zaharah 2002), les rafles apportées au sol se décomposent totalement en sept mois, sucres, cellulose, hémicellulose et protéines se décomposant plus rapidement que la lignine. Par contre, (Abu Bakar et al. 2011) ont trouvé une décomposition totale après 12 mois.

Selon Kheong, Rahman et al. (2010) et Abu Bakar, Darus et al. (2011), les apports de rafles sont à l'origine d'**augmentations de rendements**, notamment lorsque ceux-ci sont associés à une fertilisation chimique appliquée dès les premiers stades de développement de la plante. L'application de rafles au moment de la plantation des palmiers à huile permet de réduire la période d'immaturité de plusieurs mois (Lim et. Chan 1989) et stimule le développement des racines, facteur important dans l'obtention de meilleurs rendements et de l'état de nutrition du palmier (Kheong et al. 2010).

Les rafles sont également susceptibles d'impacter les trois composantes de la fertilité du sol : physique, chimique et biologique. Concernant la composante chimique, (Abu Bakar et al. 2011) ont montré que l'application sur une période de 10 ans de 300 kg de rafles par palmier et par an, soit  $\approx 40$  t/ha/an avec une densité de 147 palmiers/ha en production industrielle, entraînait une augmentation du pH du sol et de la capacité d'échange cationique (CEC) ainsi que de la teneur en carbone organique. (Caliman et al. 2001b) ont mis en avant que le potassium (K) était presque intégralement libéré trois mois après l'apport de rafles, se traduisant par une augmentation du K échangeable dans le sol. L'azote est libéré plus lentement. Une augmentation du pH pour atteindre la neutralité à partir d'un sol acide à également pu être observée. Cet effet, non permanent, semble apparaître deux mois après application, et persister pendant six mois. Concernant les propriétés physiques du sol, l'EFB améliore la structure du sol et la capacité de rétention de l'eau, réduisant de ce fait les risques de ruissellement et d'érosion (Singh et al. 1999), tout en baissant la température du sol (Abu Bakar et al. 2011). De plus, associé à une fertilisation chimique, l'application participe à protéger l'environnement en diminuant les risques de pertes de fertilisants comparé au traitement sans EFB, notamment pour le NPK (Asma et al. 2011).

L'évaluation des performances environnementales de ces pratiques devient aujourd'hui nécessaire, notamment dans la démarche RSPO. Au niveau de la fertilité biologique, l'application de rafles est censée

stimuler l'activité des organismes du sol intervenant dans la décomposition du paillis et participant ainsi à l'amélioration des propriétés physiques et chimiques du sol (Singh et al. 1999). Quelques observations ont été faites sur des champignons se développant en surface du paillis, mais, aucune étude n'a été faite à ce jour pour caractériser en détails l'impact de ces apports de matière organique sur les organismes du sol sous palmiers à huile.

Cette étude s'inscrit en continuité des précédentes. Elle vise à participer à l'analyse des impacts des apports de résidus organiques sur la qualité globale des sols sous palmiers à huile, en incluant la composante biologique.

La variation temporelle des populations de macrofaune et de nématofaune du sol sous le paillis de rafles, en relation avec leur décomposition entre deux applications est analysée.

L'hypothèse de travail H1 est que les proportions relatives de ces différentes populations et les caractéristiques physico-chimiques dans l'horizon superficiel du sol varient au cours du temps, en relation notamment avec l'état d'avancement de la décomposition des rafles.

Une hypothèse associée H2 est que les apports organiques favorisent l'importance de la composante biologique et augmentent les taux de matière organique en surface.

L'objectif de l'étude est donc de décrire l'évolution des composantes physiques, chimiques et biologiques du sol parallèlement à la décomposition des rafles au cours de cette séquence. L'analyse critique des résultats devra d'abord porter sur les méthodologies adoptées pour mesurer les évolutions de la qualité globale du sol. Par ailleurs, des pistes de réflexion seront dégagées concernant les relations entre les états du sol et la séquence d'évolution des rafles (variations temporelles de la composition du paillis).

## 4 Matériel et Méthodes

### 4.1 Site d'expérimentation

L'expérimentation se déroule en Indonésie sur l'île de Sumatra dans la province de Riau (1<sup>ère</sup> province productrice d'huile de palme brute à l'échelle indonésienne) (WWF 2011) (0°55'32.82''N ; 101°11'37.20''E) (Annexe 1, Figure 29). La culture du palmier à huile sur l'île remonte à 1911. La plantation de Libo qui accueille cette étude appartient à la société PT SMART du groupe « GAR » formé en 1962. L'échantillonnage a été réalisé de mai à juin entre la saison des pluies (août à janvier et mars à mai) et la saison sèche (février et juin à juillet), en climat équatorial humide. La zone est caractérisée par des moyennes de température de l'ordre de 28 °C et une moyenne annuelle des précipitations de 2500 mm pour la période 2009-2010 (ird 2013). L'extraction et l'analyse de la macrofaune est réalisée sur les mois de mai et juin 2013 qui correspond à la fin de la saison humide, période réputée favorable pour l'étude de la macrofaune (Rossi and Blanchart 2005).

La plantation de Libo où se déroule l'échantillonnage a été mise en place entre 1986 et 1989 derrière une forêt secondaire. La plantation de l'ordre de 5000ha est organisée en 166 blocs commerciaux de 30 ha (1km

de long par 300 m de large) composés de 130 lignes de 34 palmiers soit une densité de 147 palmiers à l'hectare. Les blocs sont matérialisés par les routes de récolte des régimes formant des damiers visibles par image satellite (Annexe 1, Figure 30). À l'intérieur des blocs, les arbres sont disposés en quinconce tels que représentés sur la Figure 1

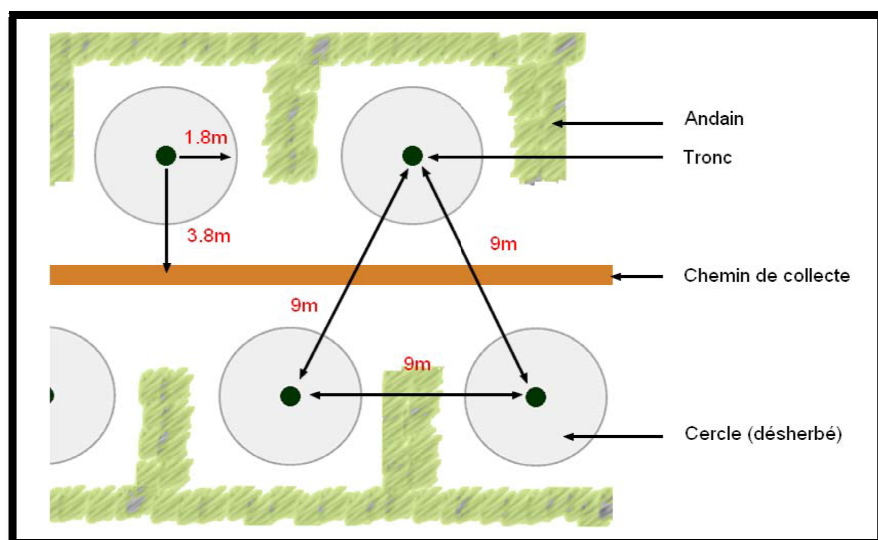


Figure 1 : Schéma d'organisation des parcelles de la plantation (extrait de Auriac 2012)

avec un chemin de récolte (noté P) une interligne sur deux. Les palmiers coupés au moment de la récolte sont déposés en forme de U pour former l'andain. Les apports de rafles sont réalisés tous les deux ans au niveau du chemin de récolte. La masse de résidus organiques épandue est de 60 t/ha, ce qui représente 408 kg par palmier ou encore 46 kg /m<sup>2</sup> /2 ans sur le chemin de récolte. Un disque d'1,8 m de rayon est désherbé au pied de chaque palmier pour faciliter la récolte. La surface constituée de ces différentes zones autour d'un palmier, andain, cercle désherbé et chemin de récolte, forme une parcelle élémentaire. Des apports complémentaires d'engrais sont réalisés tous les deux ans : de l'urée (N), à hauteur de 1kg par arbre, est appliquée sur les rafles après l'application ; 1,5 kg de Triple Super Phosphate (P), 1,5 kg de Super Dolomite (Mg) et 1,5 kg de High Grade Fertilizer Borate (B) sont appliqués par arbre sur la zone désherbée.

Les sols de la plantation sont ferralitiques (rouges, pauvres en silice et riches en hydroxydes de fer et d'aluminium) à gibbsite et kaolinite. Les sols sont acides (pH compris entre 4 et 5,5) avec une texture sableuse (70 à 90 %). La topographie varie peu avec des dénivelés faibles de moins de 50 m. Néanmoins elle constitue le principal facteur d'hétérogénéité avec les zones de bas-fonds, les zones de pente et les zones de plateau. Toutes les parcelles de prélèvement sont situées sur ces dernières zones « en plateau ». Les zones en bordure de bloc ou de clairière sont également évitées.

## 4.2 Dispositif expérimental

La chronoséquence est composée de 6 dates différentes (dites « traitements ») correspondant au délai écoulé depuis la précédente application de rafles (1, 3, 6, 12, 18 et 24 mois). Le témoin est constitué de parcelles n'ayant jamais reçu de rafles (conv). Chaque traitement est analysé sur douze emplacements (répétitions) dispersés de façon aléatoire dans la plantation.

Les prélèvements sont faits sous la zone d'épandage des rafles. Pour le témoin, ils sont faits en bordure de « la trace marchée » (Figure 2). Les emplacements d'échantillonnages sont choisis afin de limiter le biais lié à l'inévitable irrégularité d'épandage des rafles, à ce grain de précision (application mécanisée à l'échelle industrielle).



Figure 2 : Zones de prélèvements des échantillons

## 4.3 Protocole de prélèvement des échantillons

Chaque emplacement d'analyse fait l'objet de quatre types de prélèvements distincts permettant l'analyse de la macrofaune et de la nématofaune, la mesure de certains paramètres physiques (densité apparente, stabilité des agrégats) et chimiques. L'ensemble de ces analyses sont réalisées sur les 15 premiers centimètres de sol en distinguant l'horizon superficiel A0, substrat minéral riche en matière organique et de couleur sombre, et l'horizon A1 de couleur marron clair en dessous. L'épaisseur de l'horizon A0 est mesurée.



### 4.3.1 Échantillonnage de la macrofaune du sol

L'analyse de la macrofaune est basée sur 168 échantillons (84 parcelles élémentaires, 2 horizons). La méthode de collecte utilisée est une variante de la méthode TSBF (Tropical Soil Biology and Fertility) initialement créée par Anderson et Ingram en 1993, décrite dans (Tondoh et al. 2013). Une surface de 0,625 m<sup>2</sup> est délimitée à l'aide d'un cadre carré en bois, et le sol est prélevé sur une profondeur de 15cm en distinguant les deux horizons A0 et A1. La macrofaune est extraite manuellement et stockée dans de l'alcool à 70 %. L'identification de la macrofaune a été réalisée par le stagiaire, dans le laboratoire de Smart-RI, à l'aide d'une clé de détermination permettant la reconnaissance des différents ordres des organismes du sol (Ruiz et al. 2008).

### 4.3.2 Échantillonnage de la nématofaune du sol

Pour l'analyse de la nématofaune, un échantillon composite est réalisé sur site à partir de 4 parcelles élémentaires, sur les douze d'un même traitement. Les deux horizons A0 et A1 sont distingués, soit 42 échantillons au total. Chaque situation est donc mesurée avec 3 répétitions. Chaque échantillon composite est tamisé à 6 mm puis calibré à 300g de sol. Les échantillons sont acheminés par transporteur express de l'Indonésie vers la France au laboratoire ELISOL-Environnement. Le prélèvement, l'extraction par élutriation et l'identification des nématodes du sol à l'aide de la loupe binoculaire sont réalisés à partir de la *NORME NF EN ISO 23611-4 oct 2011. Qualité du sol – Prélèvement des invertébrés du sol – Partie 4 : Prélèvement, extraction et identification des nématodes du sol* ; dérivée des travaux de Seinhorst de 1962 (Tabarant et al. 2011).

### 4.3.3 Analyse des paramètres physiques du sol

L'analyse des paramètres physiques est basée sur 168 échantillons (84 emplacements, 2 horizons). La densité apparente ( $d_a$ ) (souvent appelée « masse volumique ») est le rapport entre la masse sèche de l'échantillon et son volume apparent. Le sol est prélevé à l'aide d'un cylindre métallique ouvert aux deux extrémités dont le volume est connu au départ. Le sol est par la suite séché puis pesé (Yoro and Godo 1990) ; la stabilité des agrégats correspond à la résistance de la structure du sol face à l'action dégradante des facteurs mécaniques ou physico-chimiques. Cette stabilité est mesurée grâce au dispositif de tamisage humide (wet sieving apparatus) (Annexe 2) : La fraction stable est égale au poids des agrégats obtenus avec une solution dispersante divisé par la somme des poids des agrégats obtenus avec l'eau et la solution dispersante. L'ensemble de ces analyses a été réalisé dans le laboratoire de Smart-RI par le stagiaire.

### 4.3.4 Analyses des caractéristiques chimiques du sol et de la litière

L'analyse des paramètres chimiques est basée sur 63 échantillons : 21 emplacements (1 échantillon composite pour 4 emplacements d'un même traitement) et 3 horizons O, A0, A1. L'horizon O correspond à la litière composée de rafles chez les traitements EFB et/ou de mousses, petits végétaux et débris organiques,

notamment chez le témoin. Des échantillons composites de 300g de sol ou litière séchés au four, tamisés à 2 mm, seront utilisés pour l'ensemble des analyses chimiques. Les teneurs en éléments (C organique, N total, P total et disponible, K total et disponible et cations échangeables K, Ca, Mg et Na) et le pH (réel et potentiel) sont mesurés à la fois dans la litière et le sol. La texture et la Capacité d'Échange Cationique (ou CEC) sont déterminés pour le sol. Une analyse des cendres de rafles est réalisée afin de connaître le pourcentage de matière organique (AFNOR 1977).  $\%MO = 100 - \%cendres$

L'ensemble de ces analyses a été réalisé par le laboratoire de Smart-RI.

*Le détail des nombres d'échantillons et de répétitions en fonction de l'analyse est retrouvé en Annexe 3. Le planning d'échantillonnage en Annexe 4.*

#### 4.4 Méthodes d'analyse des paramètres biologiques

Les paramètres biologiques (macrofaune et nématofaune) sont étudiés grâce à deux approches complémentaires : 1) L'approche taxonomique, qui s'appuie sur la classification des êtres vivants par taxon (famille, ordre, classe, embranchement) ; 2) l'approche fonctionnelle, qui correspond à la diversité des rôles remplis par les organismes du sol. Ici, la classification s'appuie généralement sur les habitudes nutritionnelles et la place des organismes dans les réseaux trophiques ; mais pas toujours comme dans le cas des ingénieurs du sol.

##### 4.4.1 Méthode d'analyse de la macrofaune

###### 4.4.1.1 Générale

L'analyse de la macrofaune passe par le calcul de l'abondance (le nombre d'individus) et de la biomasse. Pour tenir compte des différences de profondeur des deux horizons analysés (A0 et A1) les données de densité référant habituellement dans la bibliographie à des unités par surface de sol sont ici converties à des unités par volume (individus/m<sup>3</sup> et g/m<sup>3</sup>). Cette conversion devrait permettre la comparaison des résultats pour des tranches de sol qui diffèrent d'un protocole à l'autre.

###### 4.4.1.2 Approche taxonomique

La biodiversité est représentée par le nombre de taxons (ou richesse taxonomique) et l'équilibre relatif entre ces taxons. Ce niveau d'équilibre est mesuré par l'Entropie de Shannon ou indice de Shannon (H'). Couramment utilisé, cet indice permet la comparaison avec d'autres systèmes de culture (Grall and Coïc 2006).

$$H' = - \sum_{i=1}^S p_i \log p_i \quad \text{où} \quad p_i = \frac{n_i}{N}$$

**Avec :**  $p_i$  = abondance proportionnelle ou pourcentage d'importance de l'espèce  
 $S$  = nombre total d'espèces  
 $n_i$  = nombre d'individus d'une espèce dans l'échantillon  
 $N$  = nombre total d'individus de toutes les espèces dans l'échantillon

#### 4.4.1.3 Approche fonctionnelle

Même à l'échelle de l'ordre, il est souvent possible d'avoir le rôle principal de l'organisme sans avoir besoin de descendre au rang de l'espèce. Trois catégories de groupes trophiques sont généralement retenues (Tableau 1) : les consommateurs de litière (saprophages), les consommateurs de feuilles (phytophages) et les prédateurs. À cela s'ajoute le groupe des ingénieurs de l'écosystème.

**Tableau 1 : Composition des groupes fonctionnels de macrofaune à partir des différents ordres et classes d'organismes du sol recueillis sous palmiers à huile. Source : (Lavelle 1996; Ruiz et al. 2008)**

Saprophages	Phytophages	Prédateurs	Ingénieurs de l'écosystème
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dermapteria</li> <li>• Diplopoda</li> <li>• Coleoptera</li> <li>• Blattoptera</li> <li>• Acaridae</li> <li>• Diptera</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hemiptera</li> <li>• Orthoptera</li> <li>• Lepidoptera larvae</li> <li>• Mollusques</li> <li>• Larves de scarabées</li> <li>• Homoptera</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Araneidae</li> <li>• Chilopoda</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Formicidae</li> <li>• Lumbricina</li> <li>• Isoptera</li> </ul>

#### 4.4.2 Méthode d'analyse de la nématofaune

L'analyse de la nématofaune passe par l'identification taxonomique des communautés de nématodes (famille) et par le calcul de leur densité. Cette identification se fait principalement sur la base de la morphologie des organismes. L'intérêt des nématodes est qu'ils se déplacent à différents niveaux de la chaîne trophique et, de ce fait, leur caractérisation donne une information sur l'ensemble du réseau trophique du sol (Villenave, communication personnelle).

Les différentes familles sont ensuite réparties en cinq groupes fonctionnels basés sur leurs habitudes alimentaires, elles-mêmes déterminées à partir de leur morphologie : les phytophages, les entomopathogènes, les bactériovores, les fongivores, et les prédateurs et omnivores qui sont rangés dans le même groupe (Bongers and Ferris 1999). Différents indices sont calculés qui renseignent sur la stabilité du milieu (SI), la dynamique des nutriments (EI) et l'effet de différentes perturbations sur le sol (MI = indice de maturité ; PPI = indice des nématodes phytophages ; NCR = indice des voies de décomposition et CI = Channel index) (Villenave et al. 2010).

Indice de maturité :

$$MI = \sum v_i \times p_i$$

Avec :

$v_i$  : Valeur de c-p pour le  $n^{\text{ième}}$  taxon

$p_i$  : Proportion du  $n^{\text{ième}}$  taxon dans l'ensemble de la communauté

$$PPI = \sum v_i \times p_i$$

PPI = basé sur les nématodes phytoparasites uniquement



Dynamique des nutriments et stabilité du milieu :

$$EI = 100 \times \frac{e}{e + b} \quad \text{et} \quad IS = 100 \times \frac{s}{s + b}$$

**Avec :**      **e** : communauté d'enrichissement  
                  **b** : communauté basale  
                  **s** : communauté de structure

Channel index :

$$CI = 100 \frac{(0,8Fu_2)}{(3,2Ba_1 + 0,8Fu_2)}$$

**Avec :**      **Fu<sub>2</sub>** : fongivores dont classe c-p (colonisateur-persistant) vaut 2  
                  **Ba<sub>1</sub>** : bactériovores dont classe c-p (colonisateur-persistant) vaut 1

Indice des voies de décomposition :

$$NCR = \frac{Ba}{(Ba + Fu)}$$

**Avec :**      **Ba** : bactériovores  
                  **Fu** : fongivores

#### 4.5 Ressources statistiques et traitements statistiques

Les données ont été analysées à l'aide du logiciel de statistique R Studio. Chaque donnée est calculée à partir de 12 répétitions ; sauf dans le cas de la nématofaune et des données chimiques qui ont été réalisées sur des échantillons composites de quatre palmiers. Dans les deux cas, les données sont calculées sur trois répétitions par traitement. L'analyse de variance porte sur les six périodes de décomposition des rafles plus le témoin, soit sept traitements.

Une analyse de variance (ANOVA) à un facteur a été effectuée pour l'ensemble des données chimiques afin de mettre en avant les différences significatives entre les traitements, en distinguant les horizons A0 et A1. Les données biologiques (macrofaune et nématofaune) ainsi que les données physiques, ont été analysées à l'aide du test non paramétrique de Kruskal-Wallis, les conditions de normalité des résidus n'étant pas remplies.

Des Analyses en Composantes Principales (ACP) ont permis la mise en évidence de corrélations entre les variables par une représentation graphique. Ces analyses ont été réalisées à l'aide du package Ade4 disponible sous R Studio afin de faire apparaître les ellipses de confiance et ainsi de prendre en compte les différents traitements.

La mise en évidence d'interactions existantes entre les différentes composantes de la fertilité du sol est réalisée par le traçage d'Analyse Factorielle Multiple (AFM) sous R Studio à partir du package FactoMineR.

## 5 Résultats

Cette partie présente les résultats marquants de l'étude pour les trois composantes du sol (physique, chimique et biologique), leurs interactions, et l'évolution de la décomposition des rafles. L'intégralité des résultats est donnée dans les annexes 5, 6, 7, 8 et 9. Les écarts à la moyenne représentés sur les graphiques correspondent à l'erreur standard. Les différences significatives entre les traitements (risque 5%) sont exprimées par des lettres (a, b, c et d) différentes. L'absence de lettres malgré une statistique de test significative indique que le test bilatéral réalisé en post Kruskal-Wallis n'a pas réussi à départager les différentes moyennes deux à deux.

### 5.1 Propriétés physiques du sol

Les résultats les plus significatifs de la composante physique du sol présentés dans cette partie sont issus de l'Annexe 5 : Composante physique.

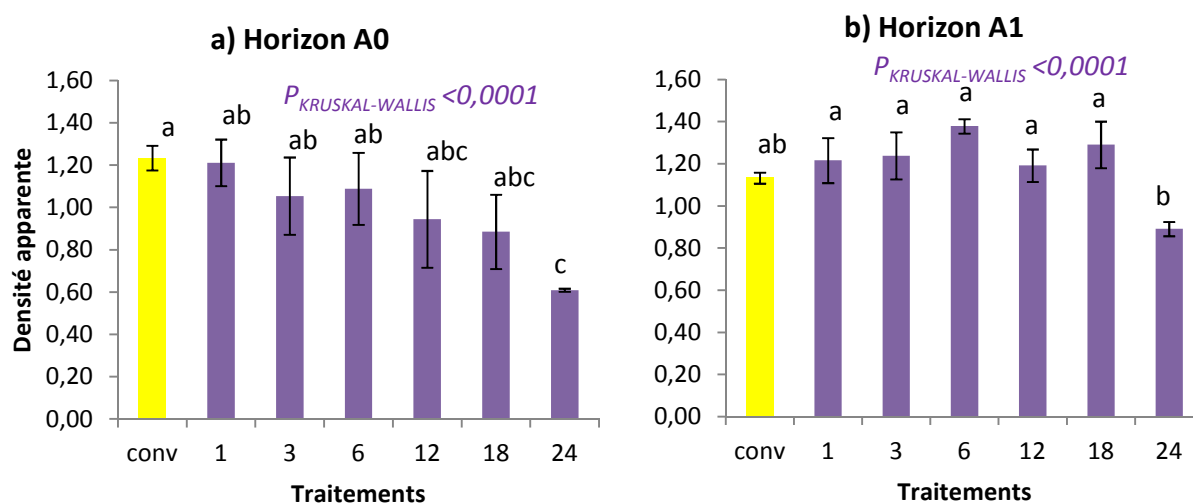
#### 5.1.1 Profondeur de l'horizon A0

**Tableau 2 : Profondeur de l'horizon A0 (cm) dans le traitement conventionnel et en fonction du délai écoulé (mois) depuis l'application des rafles**

Profondeur de l'horizon A0	Traitements (Conv ou nombre de mois depuis l'application des rafles)							Kruskal-Wallis
	conv	1	3	6	12	18	24	
	2,8	3,6	3,3	2,8	3,3	3,5	2,9	0,144

La profondeur de l'horizon A0 n'est pas influencée par le traitement (différences non significatives), c'est-à-dire par le nombre de mois depuis l'apport des rafles (Tableau 2). Les valeurs s'étendent de 1,2 à 4,0 cm. L'horizon A1 est l'horizon compris entre la limite inférieure de A0 et 15 cm.

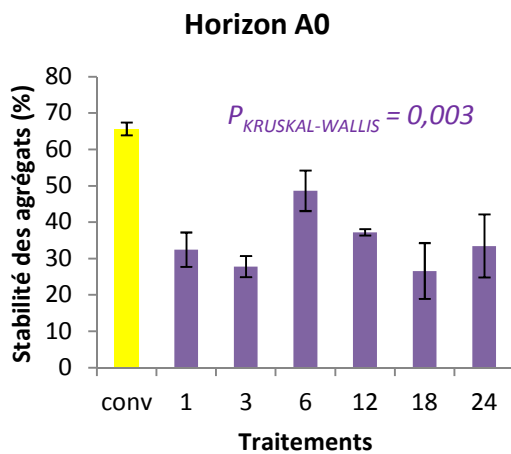
#### 5.1.2 Densité apparente



**Figure 3 : Densité apparente pour les horizons de sol A0 (a) et A1 (b) en fonction des différents traitements**

La Figure 3 a) permet de montrer une tendance à la baisse des moyennes de densité apparente qui ne devient significative qu'au bout de 24 mois ( $da_{conv(A0)} = 1,23$  ;  $da_{EFB24(A0)} = 0,61$ ). Le traitement EFB24 qui représente le point 0 avant l'apport (EFB apporté tous les deux ans) est significativement inférieur aux autres traitements (premiers mois), ce qui montre un impact négatif de l'apport nouveau de rafles sur la densité apparente de l'horizon superficiel du sol (A0). Concernant l'horizon A1 (Figure 3 b), le traitement EFB24 présente aussi des valeurs de densité apparente significativement inférieures aux autres traitements ( $da_{EFB1(A1)} = 1,22$  ;  $da_{EFB24(A1)} = 0,89$ ). Cependant, aucune tendance n'est visible entre les sept traitements.

### 5.1.3 Stabilité des agrégats



La valeur de stabilité des agrégats pour le traitement « conv. » semblent supérieures aux autres traitements EFB (Figure 4), et notamment en comparaison de EFB1, EFB3 et EFB18.

L'analyse de la stabilité des agrégats dans l'horizon A1 n'a pas donné de différences significatives. Ces résultats ne sont donc pas présentés ici.

Figure 4 : Stabilité des agrégats pour l'horizon de sol A0 en fonction du traitement

### 5.1.4 Texture

L'ensemble des blocs échantillonnés possède une texture sablo-limoneuse (traitement EFB24) et limono-sableuse (autres traitements) avec un pourcentage de sable compris entre 77 et 87 %. Les résultats pour l'horizon A0 sont présentés Figure 5.

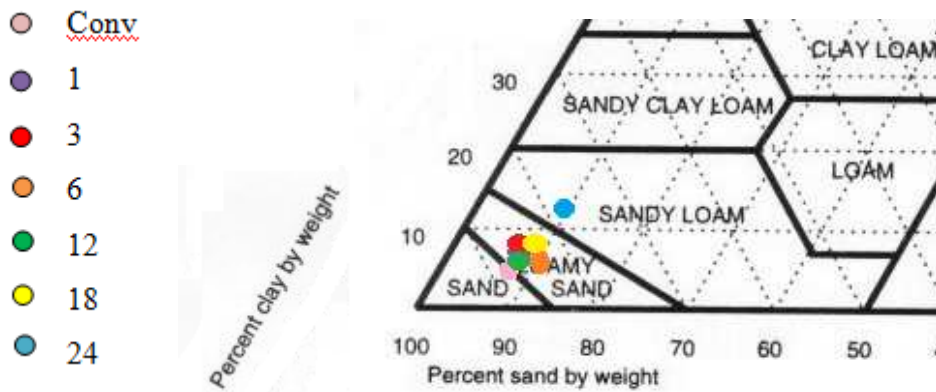


Figure 5 : Triangle des textures des blocs commerciaux échantillonnés pour les différents traitements, dans l'horizon A0

Une homogénéité des textures sur l'ensemble de la plantation ressort grâce la représentation des traitements sur un triangle de texture.

La teneur en argile de l'horizon A0 est sensible à l'effet du traitement (Figure 6 a). Une tendance à la hausse des teneurs en argile peut être observée avec le temps (en laissant de côté les traitements EFB1 et EFB3). Le traitement EFB24 est significativement plus argileux que les autres traitements (argile<sub>conv (A0)</sub> = 5 % ; argile<sub>EFB24 (A0)</sub> = 13,3 %). L'observation des teneurs en argile dans l'horizon A1 (Figure 6 b) montre une tendance inverse à la baisse, de 15,3 % pour les traitements EFB1 et EFB3 à 7,7 % pour le traitement EFB24.

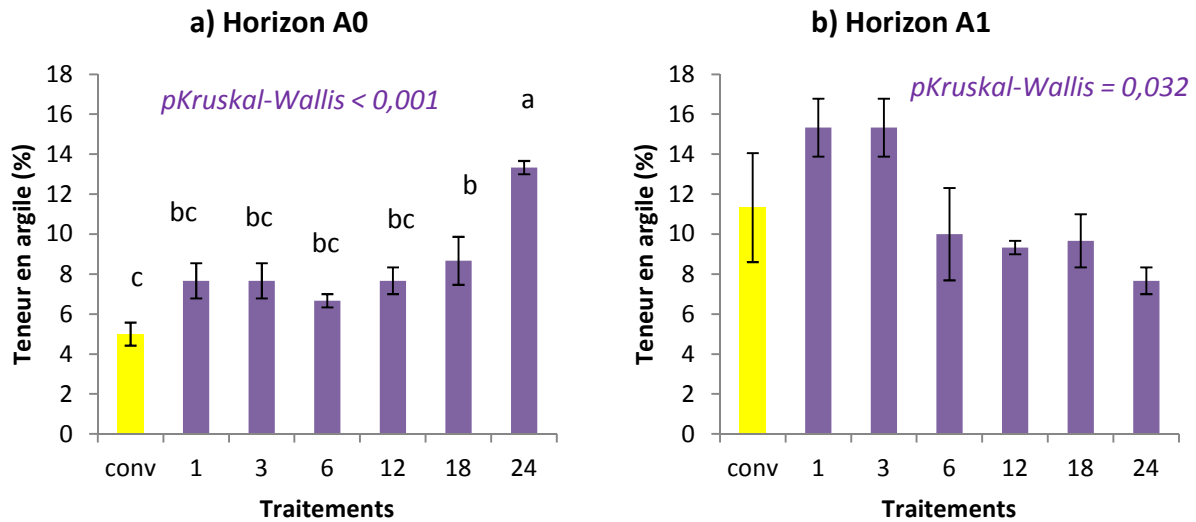
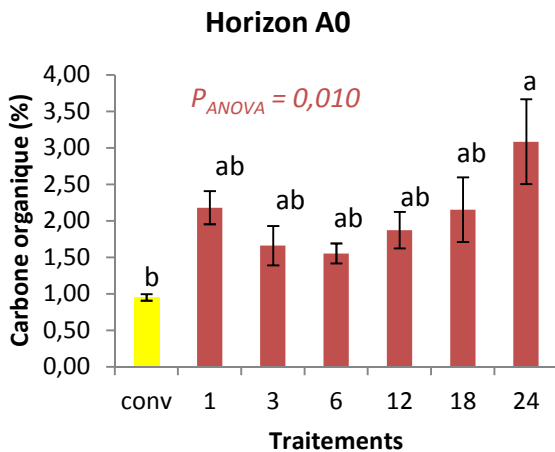


Figure 6 : Teneur en argile des horizons de sol A0 (a) et A1 (b) en fonction du traitement

## 5.2 Propriétés chimiques du sol

Les résultats les plus significatifs de la composante chimique du sol présentés dans cette partie sont issus de l'Annexe 6 : Composante chimique.

### 5.2.1 Carbone organique

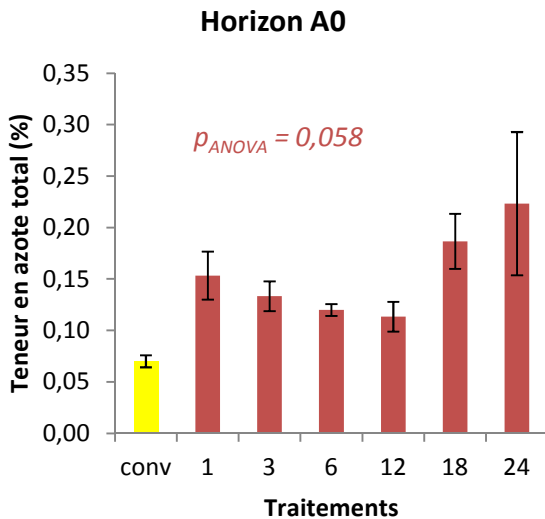


La Figure 7 montre que pour l'horizon A0, il y a une augmentation progressive de la teneur en carbone organique des sols (Corg) à partir de EFB6 jusqu'à EFB24 ( $C_{org\ EFB24\ (A0)} = 3,08\ \%$ ). Le traitement « conv » a la teneur en carbone organique la plus basse ( $C_{org\ conv\ (A0)} = 0,95\ \%$ ).

L'analyse des teneurs en Corg dans l'horizon A1 n'a pas donné de différences significatives. Les résultats ne sont donc pas affichés.

Figure 7 : Teneur en carbone organique pour l'horizon de sol A0 en fonction du traitement

### 5.2.2 Azote total



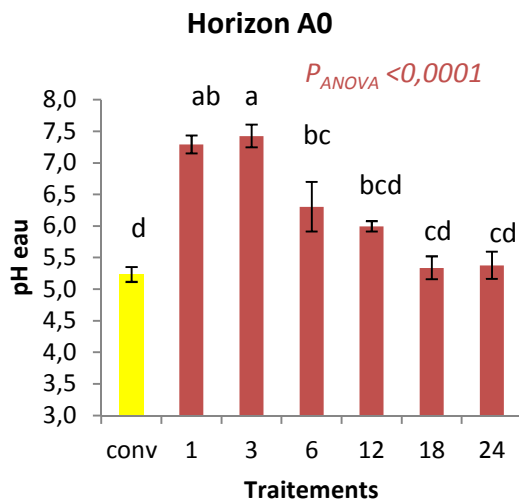
Aucune différence significative n'a été observée entre les traitements pour l'azote total (N tot). La statistique du test de l'ANOVA est cependant très proche de la significativité avec une p-value égale à 0,058 pour l'horizon A0 (Figure 8).

Les valeurs d'azote total suivent la même tendance à la hausse que pour le carbone organique avec une valeur maximale pour EFB24 ( $N_{tot\ EFB24\ (A0)} = 0,22\ \%$ ) comparé au traitement conventionnel ( $N_{tot\ conv\ (A0)} = 0,07\ \%$ ).

L'analyse des teneurs en N tot dans l'horizon A1 n'a pas donné de différences significatives. Les résultats ne sont donc pas affichés.

Figure 8 : Teneur en azote total de l'horizon A0 en fonction du traitement

### 5.2.3 pH



Une augmentation de la valeur de pH du sol est observée dans l'horizon A0 pour les traitements EFB1 et EFB3 par rapport au traitement « conv » pour atteindre la neutralité ( $\text{pH}_{\text{EFB1 (A0)}} = 7,3$  ;  $\text{pH}_{\text{EFB3 (A0)}} = 7,4$ ) (Figure 9). Une tendance à la baisse des valeurs de pH est observée dès EFB6 ( $\text{pH}_{\text{EFB6 (A0)}} = 6,3$ ).

Des valeurs de pH acides sont obtenues pour le traitement conventionnel ( $\text{pH}_{\text{conv (A0)}} = 5,2$ ).

L'analyse de pH dans l'horizon A1 suit les mêmes tendances.

Figure 9 : pH de l'horizon A0 en fonction du traitement

### 5.2.4 Potassium total

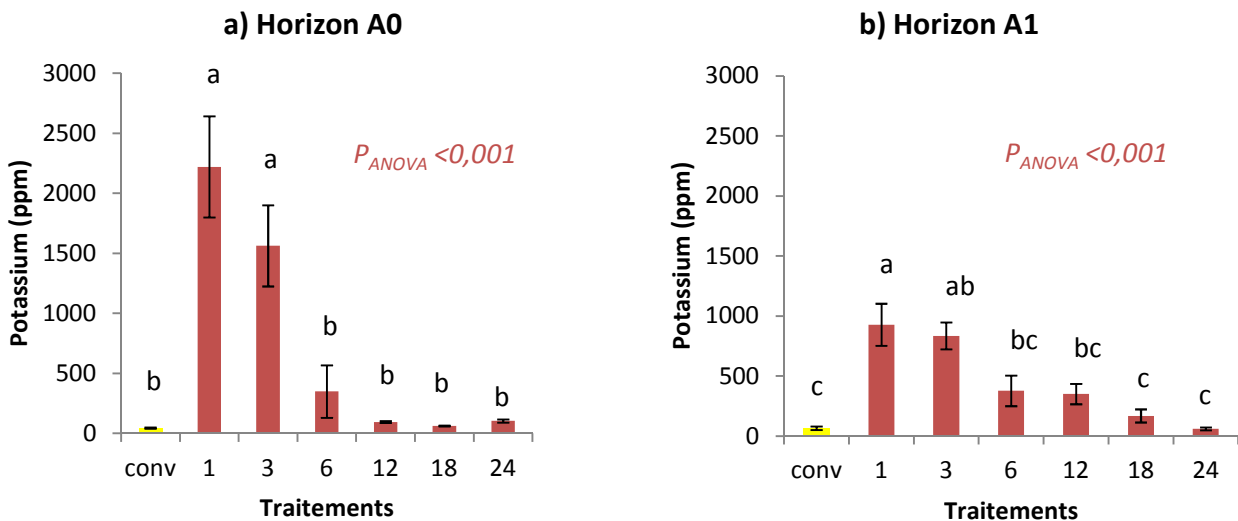


Figure 10 : Teneur en potassium total dans l'horizon A0 (Fig.10a) et A1 (Fig.10b) en fonction du traitement

L'apport de rafles entraîne une hausse de la teneur en potassium total des sols (K tot) très rapide puis décroissante. Celle-ci est davantage marquée dans l'horizon superficiel A0 que dans A1 (Figure 10 a et b). La teneur en K tot est multipliée par 50 le premier mois après l'apport et par 35 le troisième mois par rapport à la teneur en conventionnel dans l'horizon A0 ( $K_{\text{conv (A0)}} = 44\text{ppm}$  ;  $K_{\text{EFB1 (A0)}} = 2221\text{ppm}$  ;  $K_{\text{EFB3 (A0)}} = 1562\text{ppm}$ ).

### 5.2.5 Autres paramètres chimiques

D'autres paramètres chimiques sont également sensibles à l'effet des traitements. Des différences sont particulièrement visibles dans l'horizon A0. Entre autres :

La teneur en calcium du sol (Ca) augmente en fonction du traitement, de 0,89 me/100g de sol pour EFB1 à 3,49 me/100g de sol pour EFB24. La valeur la plus faible est obtenue pour le traitement conventionnel ( $Ca_{conv(A0)} = 0,82$  me/100g sol).

La saturation en bases échangeables est à son maximum à EFB3 (124,3 %) et semble par la suite décroître. La valeur minimale de saturation étant obtenue pour le traitement conventionnel (45,3%).

Pour certains autres paramètres chimiques, la statistique de test est très proche de 5 %. Avec un  $p_{ANOVA}$  de 0,057, la CEC de l'horizon A0 augmente significativement en fonction du traitement. Elle atteint son maximum à EFB24 ( $CEC_{EFB24(A0)} = 9,19$ ). La valeur la plus basse est observée pour le traitement conventionnel ( $CEC_{conv(A0)} = 2,84$ ).

### 5.3 Propriétés biologiques du sol

#### 5.3.1 La macrofaune

Les résultats les plus significatifs de la macrofaune du sol présentés dans cette partie sont issus de l'Annexe 7 : Composante biologique – Macrofaune.

##### 5.3.1.1 Macrofaune et horizons de sol

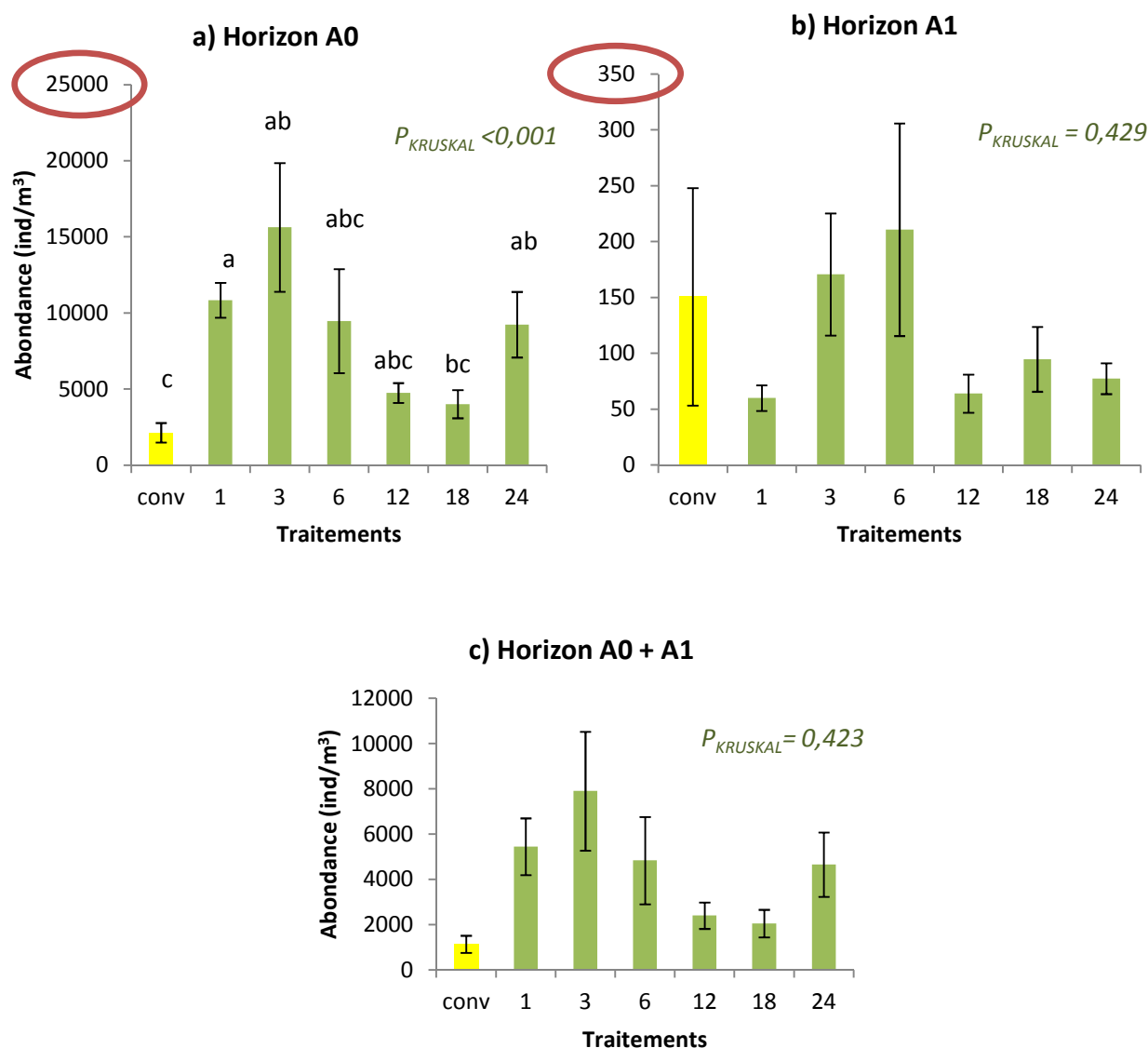


Figure 11: Abondance de la macrofaune dans les horizons A0 (Fig.11a), A1 (Fig.11b), et sur l'ensemble A0+A1 (Fig.11c) en fonction du traitement

L'horizon A0 possède des valeurs d'abondances de macrofaune significativement différentes entre les traitements (Figure 11 a). Celles-ci augmentent rapidement après l'apport de rafles et restent significativement supérieures au traitement « Conv » jusqu'à trois mois après l'application d'EFB ( $Abond_{conv(A0)} = 2126 \text{ ind./m}^3$ ;  $Abond_{EFB1(A0)} = 10831,7 \text{ ind./m}^3$ ;  $Abond_{EFB3(A0)} = 15627 \text{ ind./m}^3$ ). Trois phases



semblent apparaître dans la répartition de l'abondance en macrofaune en fonction du traitement : le premier semestre (EFB1, EFB3, EFB6), les 12 mois suivants (EFB12 à EFB18) et le dernier semestre avant le nouvel apport d'EFB (EFB24) aussi considéré comme point 0 de la chronoséquence.

L'abondance en macrofaune dans l'horizon A1 (Figure 11 b) est 10 fois inférieure à celle présente dans l'horizon A0 et ne présente pas de différences significatives entre les traitements. La raison est principalement due à des écartypes importants.

La Figure 11 c prend en compte la somme des horizons A0 et A1 en tenant compte des profondeurs respectives de chacun. Le test statistique ne fait pas ressortir de différences entre les traitements. L'étude de l'ensemble de la profondeur 0-15 cm entraîne une dilution de l'information sur l'impact du traitement. L'effet des rafles étant maximal au niveau de l'horizon superficiel, la prise en compte de l'horizon A1 n'apporte pas d'informations complémentaires.

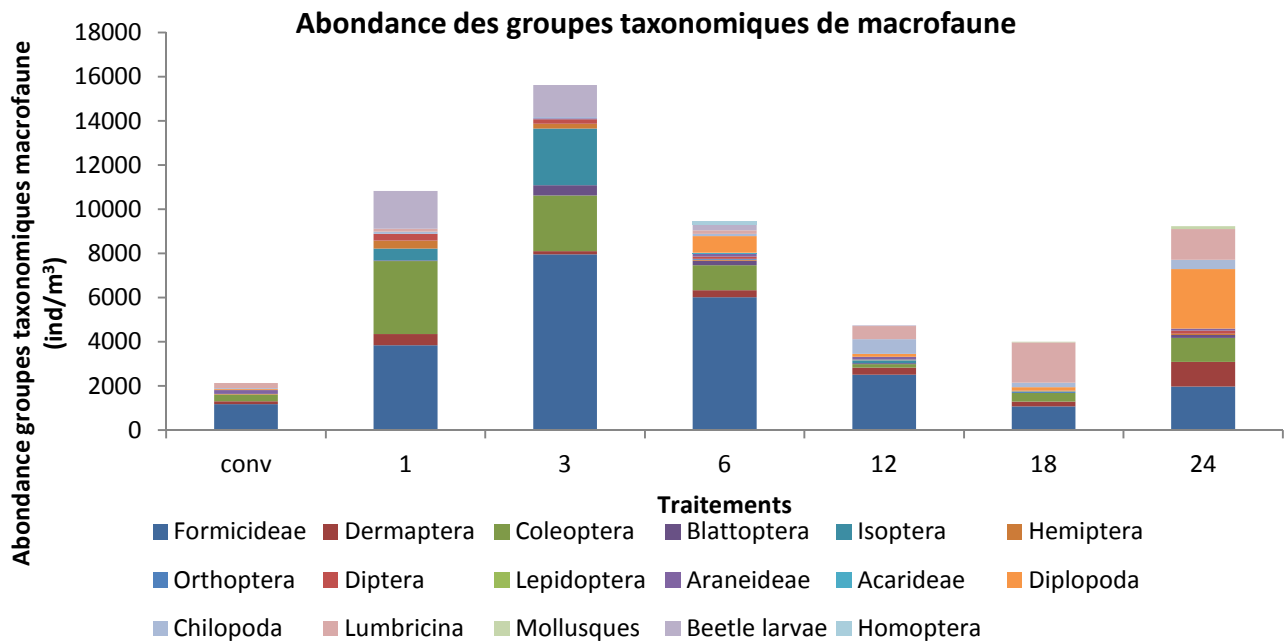
La suite de la présentation des résultats se focalisera donc sur l'horizon A0. Un retour sur la profondeur 0-15 cm (A0 + A1) sera fait dans la discussion afin de mettre en regard les résultats de cette étude avec ceux de l'étude précédente (Auriac 2012) sur la variabilité spatiale.

### 5.3.1.2 Groupes taxonomiques

#### 5.3.1.2.1 Abondance

Sur l'ensemble des prélèvements, un total de 17 groupes taxonomiques a été collecté, principalement des arthropodes. Trois groupes taxonomiques sont majoritaires : *Formicidae*, *Coleoptera* et *Lumbricina*. Ils représentent 80 % des organismes identifiés dans le traitement conventionnel et 67 % pour la moyenne des traitements EFB.

Trois phases sont retrouvées sur la Figure 12 : le premier semestre est composé majoritairement de fourmis et de coléoptères ; les traitements 12 et 18 correspondent à une zone de transition avec une baisse en abondance des fourmis et une augmentation en vers de terre ; le traitement 24 est caractérisé par une poussée de deux nouveaux groupes, les diplopodes et les dermaptères.



**Figure 12 : Représentation de l'abondance des différents groupes taxonomiques de macrofaune pour l'horizon A0 en fonction des traitements**

Le Tableau 3 donne davantage d'informations sur la répartition des différents groupes taxonomiques en exprimant pour chaque traitement, l'importance en pourcentage de chacun des groupes.

**Tableau 3 : Abondances de chaque groupe taxonomique par traitement (en %)**

Groupes taxonomiques	Traitements						
	conv	1	3	6	12	18	24
Formicidaeae	55	35	51	64	53	27	21
Dermaptera	6	5	1	3	7	5	12
Coleoptera	14	30	16	12	3	10	12
Blattoptera	0	<1	3	2	<1	0	1
Isoptera	0	5	16	0	2	0	0
Hemiptera	2	3	1	<1	0	0	<1
Orthoptera	0	0	0	<1	<1	1	0
Diptera	0	3	1	1	0	0	2
Lepidoptera	0	0	0	0	<1	<1	0
Araneidaeae	8	0	<1	1	3	<1	1
Acaridaeae	0	0	0	<1	0	0	0
Diplopoda	2	0	0	8	3	4	29
Chilopoda	2	<1	<1	1	14	5	5
Lumbricina	11	1	0	2	12	46	15
Mollusques	0	0	0	0	0	<1	1
Larves de scarabées	0	16	9	3	<1	0	0
Homoptera	0	0	0	2	0	0	0

L'ordre des *Formicidaeae* est majoritaire la première année suivant l'apport de rafles, relayé par les *Lumbricina*. Ces derniers deviennent majoritaires après 18 mois. Les *Lumbricina* sont également très présents dans le traitement conventionnel. Certains groupes prennent de l'importance sur de courtes durées. Les *larves de scarabées* ressortent au traitement EFB1 pour devenir le troisième groupe majoritaire. De même pour les *Isoptera* au 3<sup>ème</sup> mois, les *Diplopoda* au 6<sup>ème</sup> et 24<sup>ème</sup> mois et les *Chilopoda* au 12<sup>ème</sup> mois.

Les différents groupes taxonomiques ne sont pas tous influencés par l'effet traitement (Annexe 7, Tableau 16). La Figure 13 reprend les groupes taxonomiques sensibles à cet effet et les met en relation dans une ACP et un cercle des corrélations afin de mettre en évidence des liens existants entre ces groupes ainsi que la relation au traitement.

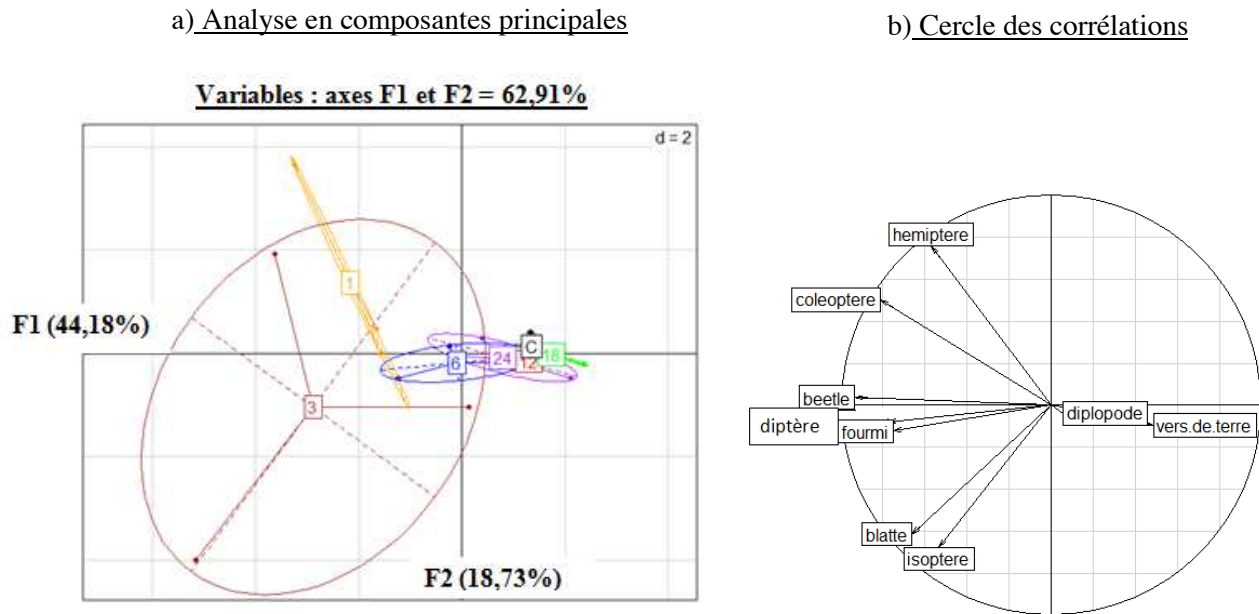


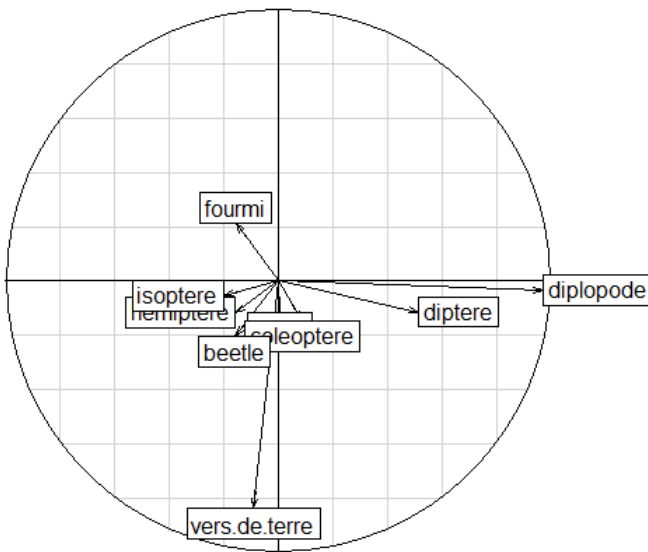
Figure 13 : ACP des abondances des groupes taxonomiques de macrofaune avec ellipses de confiance basées sur les traitements (Fig.13a) et cercle des corrélations fonction des axes 1 et 2 (Fig13b)

Les larves de scarabées (beetle) (21,97 %), les coléoptères (16,50 %) et les diptères (15,15 %) représentent les trois groupes les plus importants intervenant dans la construction de l'axe 1. Les hémiptères (33,92 %), les isoptères (27,02 %) et les blattes (22,23 %) interviennent majoritairement dans la construction de l'axe 2. Le pourcentage cumulé de l'inertie de ces deux axes est de 62,91 %.

Les deux graphiques montrent un effet « abondance » représenté par l'axe 1. Les traitements EFB1 et EFB3 présentent une abondance supérieure aux autres traitements.

Les traitements 6 à 24 se rapprochent davantage du traitement conventionnel en termes de groupes taxonomiques (Figure 13 a). Le traitement 1 se projette davantage sur l'axe 2 et est représenté majoritairement par les hémiptères et les coléoptères. A l'inverse, le traitement 3 est représenté majoritairement par les blattes et les isoptères.

Il semble exister un lien entre les larves de scarabées, les fourmis et les diptères (Figure 13 b). Les deux premiers axes de l'ACP permettent de représenter sept groupes taxonomiques sur les neuf. Les diplopodes et les vers de terre sont très mal représentés ici.



La prise en compte de quatre axes par l'ACP permet de représenter 87,25 % de l'inertie totale. L'axe 3 est représenté par les diplopodes (70,35 %) et les diptères (19,89 %). L'axe 4 est expliqué par les vers de terre (82,09 %).

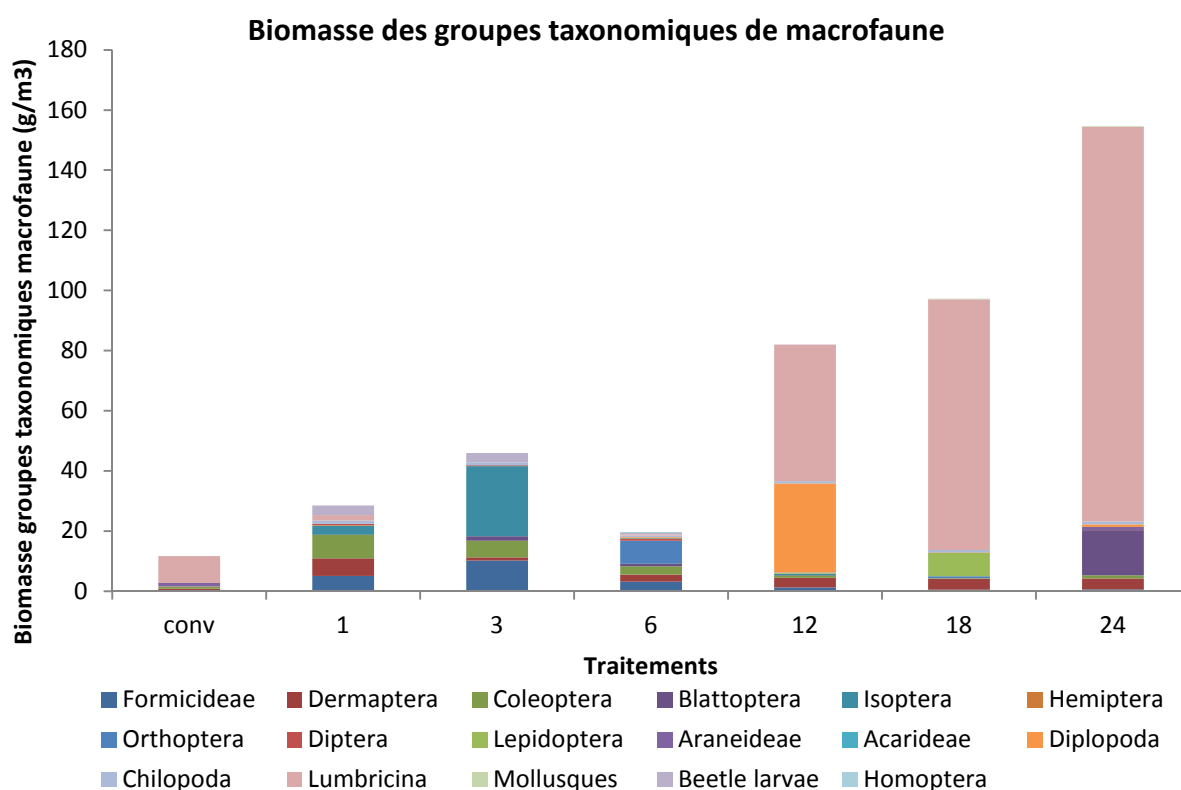
Un lien semble exister entre les diptères et les diplopodes (Figure 14). Les vers de terre ne semblent présenter aucun lien avec les autres groupes taxonomiques.

Figure 14 : Cercle des corrélations des groupes taxonomiques de macrofaune avec prise en compte des axes 3 et 4

### 5.3.1.2.2 Biomasse

Les trois groupes taxonomiques majoritaires en termes de biomasse diffèrent par rapport à l'abondance. Les vers de terre, araignées et coléoptères représentent 93 % de la biomasse dans le traitement conventionnel. Les vers de terre, isoptères et fourmis représentent 60 % de la biomasse pour la moyenne de tous les traitements EFB.

Les trois phases décrites dans la partie précédente (5.3.1.2.1 Abondance) se retrouvent facilement dans la Figure 15 ci-dessous. Malgré leur abondance, les fourmis pèsent peu en termes de biomasse, à l'inverse des vers de terre dont l'abondance est liée à la biomasse.



**Figure 15 : Représentation des biomasses des différents groupes taxonomiques de macrofaune pour l'horizon A0 en fonction des traitements**

Les groupes taxonomiques dont les valeurs de biomasse sont différentes en fonction du traitement, correspondent aux mêmes groupes dont les valeurs d'abondance sont sensibles à l'effet traitement.

### 5.3.1.3 Richesse et Diversité taxonomique

Tableau 4 : Richesse taxonomique (ou nombre de taxons) en fonction du traitement

	Traitements						
	Conv	1	3	6	12	18	24
<b>Nombre de taxons</b>	8	10	10	14	12	10	11

La richesse taxonomique retrouvée dans le traitement conventionnel est de 8 taxons (Tableau 4). La richesse moyenne des traitements EFB est de 11 taxons. Une croissance est observée jusqu'au traitement EFB6 (14 taxons) suivi d'une baisse.

La mesure de la diversité taxonomique a été réalisée pour chacun des traitements par le calcul de l'indice de Shannon (4.4.1.2 Approche taxonomique).

Tableau 5 : Indices de Shannon pour les horizons A0 et A1 en fonction du traitement

H shannon	Traitements							Kruskal-Wallis
	conv	1	3	6	12	18	24	
<b>A0</b>	1,082 <sup>b</sup>	1,532 <sup>a</sup>	1,257 <sup>ab</sup>	1,379 <sup>ab</sup>	1,414 <sup>ab</sup>	1,181 <sup>ab</sup>	1,454 <sup>ab</sup>	0,022*

La valeur de l'indice de Shannon a tendance à être supérieure pour tous les traitements EFB par rapport au traitement « conv » (Tableau 5). Le traitement EFB1 est significativement supérieur au traitement « conv », le traitement EFB1 possède donc une plus grande hétérogénéité de biodiversité en macrofaune en comparaison du traitement conventionnel.

### 5.3.1.4 Groupes fonctionnels

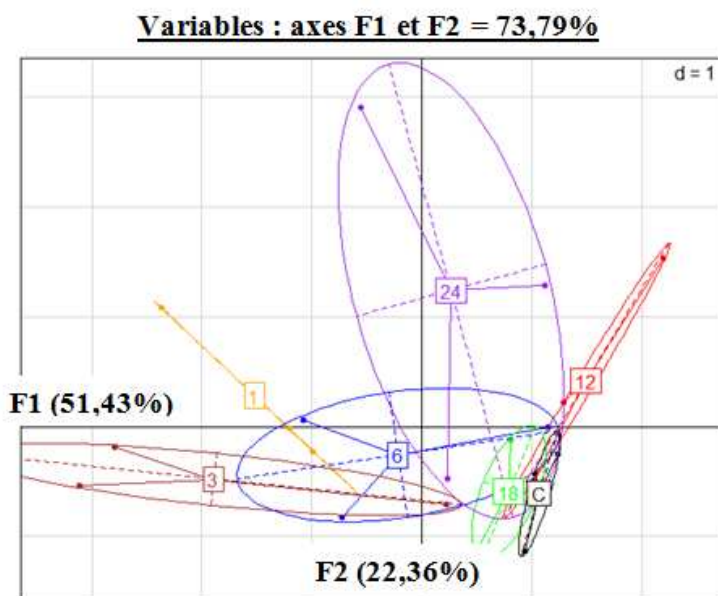
Les quatre groupes fonctionnels sont présents dans les différents traitements avec des abondances variables (Tableau 6). Les ingénieurs du sol (englobant les vers de terre, les fourmis et les termites) sont majoritaires sur les 18 premiers mois : au sein de ce groupe, les fourmis et isoptères dominants au cours du premier semestre laissent progressivement la place aux vers de terre. Deux ans après l'application de rafles c'est le groupe des saprophages qui devient dominant avec une forte augmentation des populations de diplopodes, diptères et dermaptères. Les saprophages restent le deuxième groupe prédominant dans tous les traitements. Au traitement EFB12, ils sont à égalité avec les prédateurs.

Tableau 6 : Pourcentage des abondances de chaque groupe fonctionnel par traitement (en %)

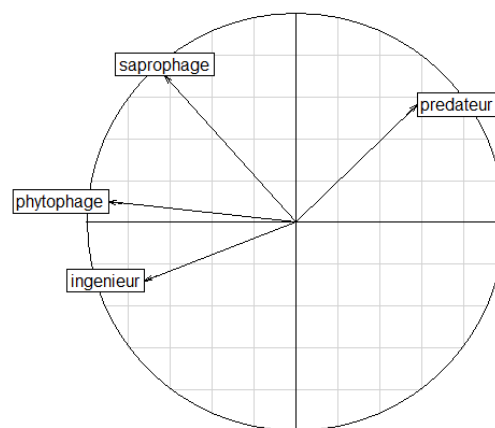
Groupes fonctionnels	Traitements						
	conv	1	3	6	12	18	24
<b>Ingénieurs du sol</b>	<b>66</b>	<b>42</b>	<b>67</b>	<b>65</b>	<b>67</b>	<b>72</b>	36
<b>Saprophages</b>	22	38	21	27	14	19	<b>56</b>
<b>Phytophages</b>	2	19	11	5	2	3	2
<b>Prédateurs</b>	10	1	1	2	17	6	6

La Figure 16 met en relation les quatre groupes fonctionnels dans une ACP et un cercle des corrélations afin de mettre en évidence des liens existants entre ces groupes ainsi que la relation au traitement.

a) Analyse en Composantes Principales



b) Cercle des corrélations



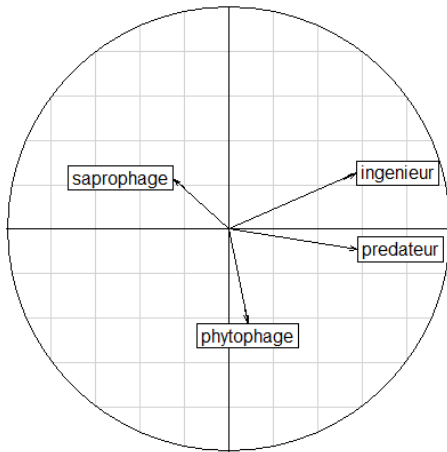
**Figure 16 : ACP des abondances des groupes fonctionnels de macrofaune avec ellipses de confiance basées sur les traitements (Fig.16a) et cercle des corrélations (Fig.16b)**

Les phytophages (39,10 %) et les ingénieurs du sol (25,50 %) interviennent dans la construction de l'axe 1. Les saprophages (54,79 %) et les prédateurs (35,47 %) interviennent majoritairement dans la construction de l'axe 2. Le pourcentage cumulé d'inertie des deux premiers axes est de 73,79 %.

Mise à part le groupe des prédateurs, l'ensemble des groupes fonctionnels se retrouve à gauche de l'axe 1 ce qui met en avant un effet « abondance ». Une plus grande abondance en groupes fonctionnels est retrouvée pour les traitements EFB1 et EFB3 (Figure 16 a). Les traitements EFB1 et EFB3 sont majoritairement représentés par les phytophages et les ingénieurs du sol qui se projettent principalement sur l'axe 1. À l'inverse, le traitement EFB24 est représenté par les saprophages et les prédateurs qui se projettent sur l'axe 2.

Les ingénieurs du sol, les phytophages et les saprophages sont corrélés positivement entre eux, alors que les prédateurs semblent évoluer à l'inverse des autres groupes fonctionnels, notamment des ingénieurs du sol (Figure 16 b). Il n'existe aucun lien entre les prédateurs et les saprophages.

Mise à part le traitement EFB24, il semble y avoir un effet de baisse de l'abondance en phytophages et ingénieurs du sol du traitement EFB1 au traitement EFB18, avec un rapprochement de la composante biologique du traitement conventionnel.



Lors de la prise en compte des 4 axes de l'ACP, l'axe 3 est principalement représenté par les prédateurs (45,66 %) et les ingénieurs du sol (44,87 %). L'axe 4 est principalement représenté par les phytophages (58,84 %).

Il existe un lien entre les ingénieurs du sol et les prédateurs (Figure 17).

Figure 17 : Cercle des corrélations des groupes fonctionnels de macrofaune fonction des axes 3 et 4

### 5.3.2 La nématofaune

Les résultats les plus significatifs de la nématofaune du sol présentés dans cette partie sont issus de l'Annexe 8 : Composante biologique - Nématofaune.

#### 5.3.2.1 Nématofaune et horizons de sol

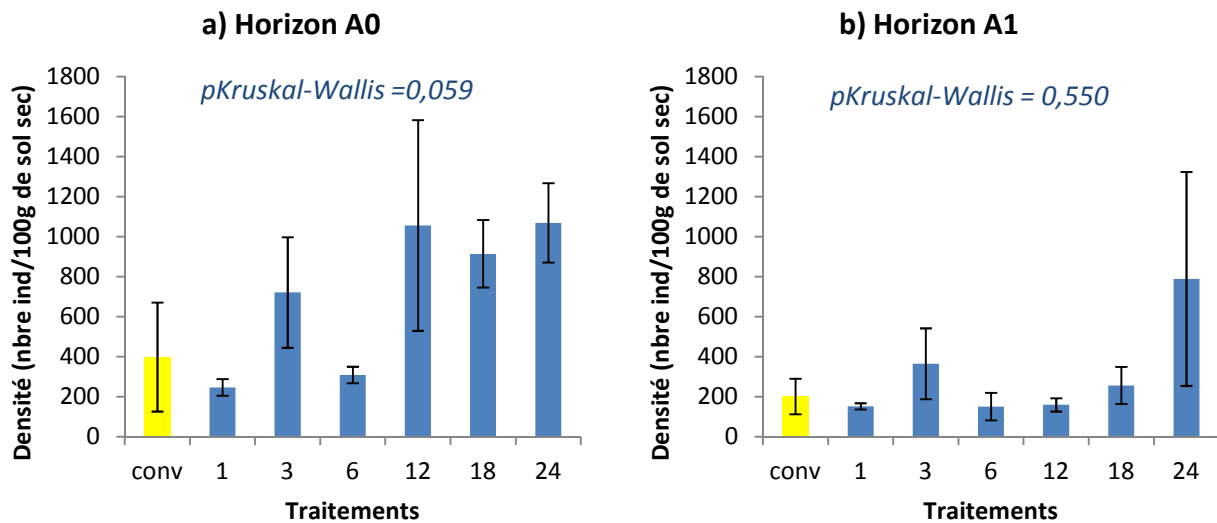


Figure 18 : Densité de nématodes pour les horizons A0 (Fig.18a) et A1 (Fig.18b) en fonction du traitement

Les prélèvements de nématodes ont montré une valeur de densité moyenne deux fois plus élevée tous traitements confondus dans l'horizon A0 (659 ind/100g sol sec) (Figure 18 a) que dans l'horizon A1 (309ind/100g sol sec) (Figure 18 b). Malgré des variances importantes d'erreur standard, les densités de nématodes semblent plus élevées à partir de la deuxième année de traitement, que dans le traitement Conv (Abond. Conv (A0) = 397 ind/100g sol sec ; Abond. EFB24 (A0) = 1068 ind/100g sol sec).



Au même titre que la macrofaune (5.3.1.1 Macrofaune et horizons de sol), davantage de résultats significatifs sont obtenus dans l'horizon A0 que dans l'horizon A1. L'effet des rafles a été maximal au niveau de l'horizon superficiel (A0). La prise en compte de l'horizon A1 n'a pas apporté d'informations complémentaires.

Cette partie s'intéressera uniquement à l'horizon A0. Un retour sur la profondeur 0-15cm (A0 + A1) sera fait dans la discussion afin de mettre en regard les résultats de cette étude avec ceux de l'étude précédente (Auriac 2012) sur la variabilité spatiale.

### 5.3.2.2 Familles de nématodes et groupes fonctionnels

Les trois familles majoritaires de nématodes retrouvées sur l'ensemble des traitements correspondent aux Tylenchidae (25,5 %) (Phytophages facultatifs), Rabditidae (22,8 %) (Bactérovores) et Belondiridae (10,4 %) (Fongivores). Ces trois familles de nématodes représentent presque 60 % de l'abondance totale en nématodes.

Tous les groupes fonctionnels de nématodes sont présents dans les différents traitements, cependant, peu de ces familles semblent sensibles à l'effet traitement.

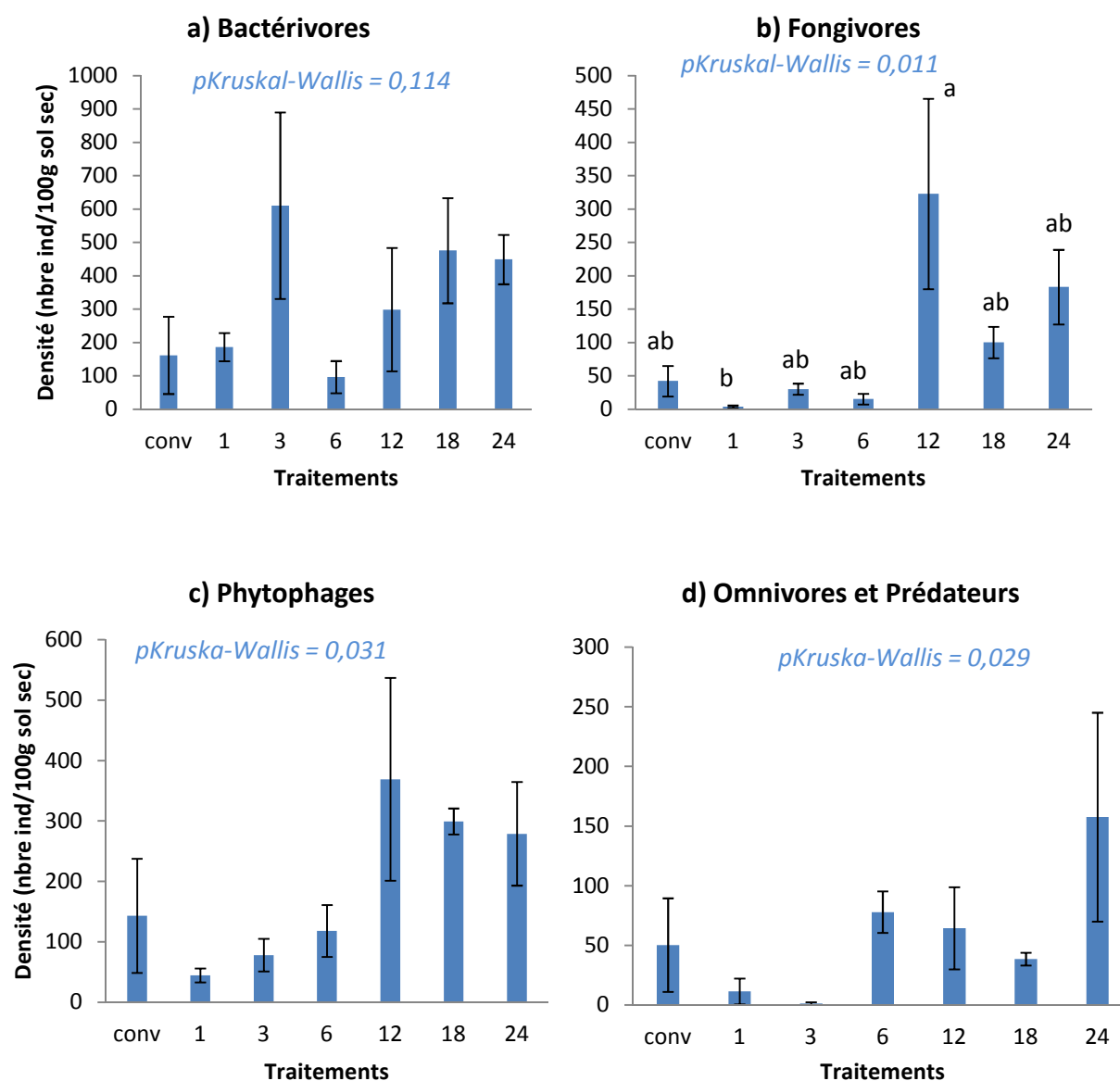
Les bactérovores représentent le groupe fonctionnel de nématodes le plus représenté avec 65 % des nématodes totaux sur l'ensemble des traitements. Suivi par les phytophages (19 %), les fongivores (10 %), et les omnivores et prédateurs (6 %).

Le Tableau 7 représente les abondances en pourcentage des différents groupes fonctionnels en fonction du traitement. Les bactérovores sont largement majoritaires 1 à 3 mois après l'apport d'EFB. À partir du mois 6, les pourcentages entre groupes fonctionnels sont plus rapprochés avec une majorité de phytophages pour les traitements EFB6 et EFB12, puis de nouveau une prédominance des bactérovores. La composition du traitement EFB24 se rapproche du traitement conventionnel quand à l'équilibre entre les différents groupes fonctionnels ; par contre, à l'exception des phytophages, l'abondance de chacun d'eux semble supérieure dans le traitement EFB24 (Figure 18 a).

Tableau 7 : Abondance des groupes fonctionnels de nématodes en fonction du traitement (en %)

Groupes fonctionnels	Traitements						
	conv	1	3	6	12	18	24
<b>Ba</b>	<b>41</b>	<b>76</b>	<b>85</b>	31	28	<b>52</b>	<b>42</b>
<b>Fu</b>	11	2	4	5	31	11	17
<b>O + Pr</b>	13	5	0	25	6	4	15
<b>Ph</b>	36	18	11	<b>38</b>	<b>35</b>	33	26

Des graphiques en histogrammes de chacun des quatre groupes fonctionnels permettent de visualiser la cinétique d'évolution de leurs densités respectives (Figure 19).



**Figure 19 : Densité des quatre groupes fonctionnels de nématodes en fonction du traitement**

Les groupes fonctionnels de nématodes semblent se développer majoritairement la deuxième année suivant l'apport de rafles. Les densités les plus fortes semblent se retrouver à partir d'EFB12 pour les fongivores et les phytophages (Figure 19 b, c), et de EFB6 pour les Omnivores et Prédateurs (Figure 19 d). En ce qui concerne les bactérovores, une poussée très importante est visible à EFB3, puis au même titre que les autres groupes fonctionnels, les densités semblent augmenter dès EFB12 (Figure 19 a).

Hormis pour le groupe des bactérovores, les densités de nématodes trouvées dans le traitement Conv sont équivalentes à celles trouvées dans les premiers mois suivants l'apport de rafles.

Un cercle des corrélations permet de voir les relations existantes entre ces différents groupes fonctionnels.

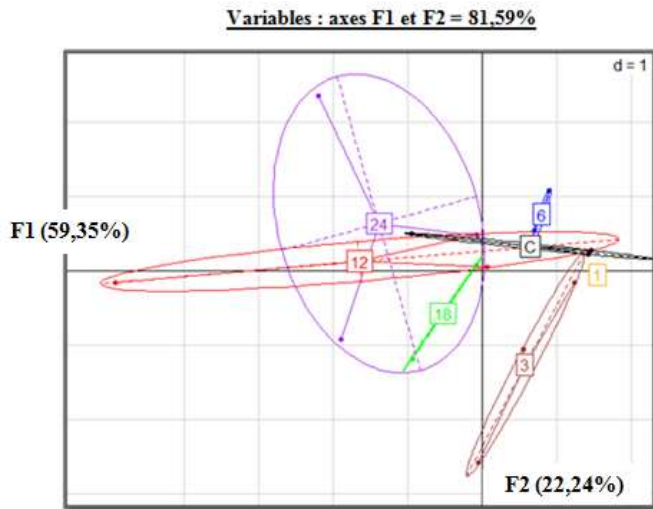
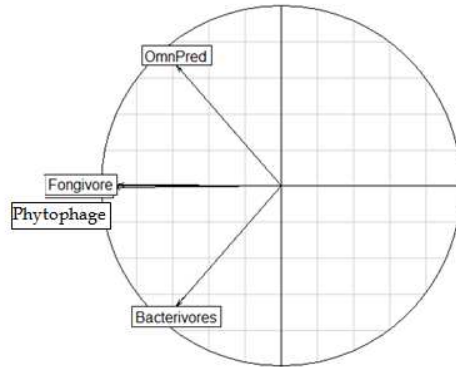
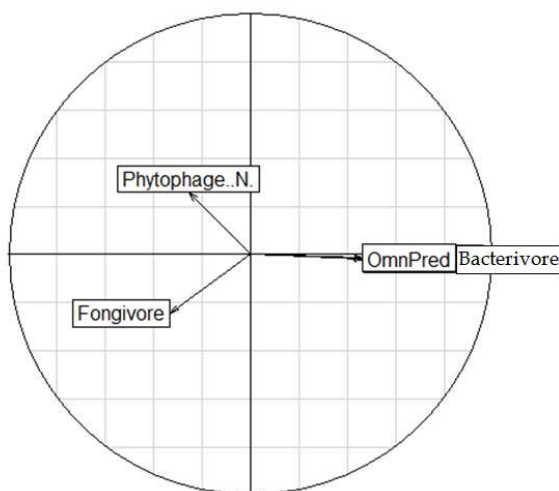
a) Analyse en Composante Principale

b) Cercle des corrélations


Figure 20 : ACP des abondances en groupes fonctionnels de nématofaune avec ellipses de confiance basées sur les traitements (a) et cercle des corrélations (b)

L'axe 1 est construit principalement avec les variables phytophages (36,59 %) et fongivores (34,96 %). L'axe 2 est construit à partir des variables Omnivores et Prédateurs (50,22 %) et Bactérovore (49,77 %). Le pourcentage cumulé d'inertie de ces deux axes est élevé (81,59 %).

L'axe 1 représente de nouveau l'effet « abondance ». Il se confirme ici que les mois 12 à 24 possèdent une plus grande abondance comparés aux premiers mois après l'apport (1 à 6). Le traitement Conv semble se rapprocher davantage des traitements EFB1 à EFB6 (Figure 20 a). Le traitement EFB24 en se projetant principalement sur l'axe 2, dépend majoritairement des omnivores et prédateurs. À l'inverse, le traitement EFB12 en se projetant sur l'axe 1, dépend des phytophages et fongivores.



Les nématodes fongivores et phytophages sont très corrélés (Figure 20 b).

Lors de la prise en compte des 4 axes de l'ACP, un lien entre omnivores/prédateurs et bactérovore apparaît (Figure 21).

Figure 21 : Cercle des corrélations des groupes fonctionnels de nématodes fonction des axes 3 et 4

### 5.3.2.3 Indices nématofauniques

Tableau 8 : Indices nématofauniques en fonction du traitement

H	groupe + ind	Traitements							KW
		conv	1	3	6	12	18	24	
A0	EI	55,4	93,8	96,2	65,4	77,3	79,8	70,5	0,108
		±11,9	±0,07	±1,7	±7,4	±7,9	±5,7	±9,0	
	SI	77,6	35,2	12,9	89,7	95,5	86,9	90,6	0,014*
		±3,6	±20,4	±12,9	±4,4	±1,2	±5,3	±2,2	
	BI	17,7	5,8	3,7	8,6	3,9	8,7	7,5	0,056
		±4,2	±0,2	±1,6	±3,5	±1,1	±3,2	±1,7	
	MI	2,65 <sup>ab</sup>	1,34 <sup>ab</sup>	1,17 <sup>b</sup>	3,14 <sup>ab</sup>	3,50 <sup>a</sup>	2,70 <sup>ab</sup>	3,01 <sup>ab</sup>	0,008*
		±0,02	±0,10	±0,09	±0,22	±0,07	±0,25	±0,17	
	PPI	2,11	2,34	2,27	2,04	2	2,14	2,11	0,267
		±0,10	±0,15	±0,11	±0,02	±0,00	±0,13	±0,08	
	NCR	0,74 <sup>ab</sup>	0,98 <sup>a</sup>	0,94 <sup>a</sup>	0,87 <sup>ab</sup>	0,43 <sup>b</sup>	0,78 <sup>ab</sup>	0,72 <sup>ab</sup>	0,010*
		±0,05	±0,01	±0,02	±0,01	±0,05	±0,10	±0,04	
	NCR*	0,46 <sup>ab</sup>	0,87 <sup>a</sup>	0,83 <sup>ab</sup>	0,42 <sup>ab</sup>	0,27 <sup>b</sup>	0,54 <sup>ab</sup>	0,52 <sup>ab</sup>	0,020*
		±0,05	±0,03	±0,06	±0,16	±0,05	±0,11	±0,05	

Le Tableau 8 ci-dessus montre un effet significatif des traitements pour les indices SI, MI, NCR et NCR\*.

La valeur de l'indice de structure (SI), comprise entre 0 et 100, augmente avec la stabilité environnementale. Malgré l'absence de différences mises en avant par le test post hoc, cette stabilité semble réduite pour les traitements EFB1 et EFB3 ( $SI_{\text{EFB1}} = 35,19$  ;  $SI_{\text{EFB3}} = 12,88$ ) comparé aux autres traitements ( $SI_{\text{conv}} = 77,64$  ;  $SI_{\text{EFB12}} = 95,51$ ).

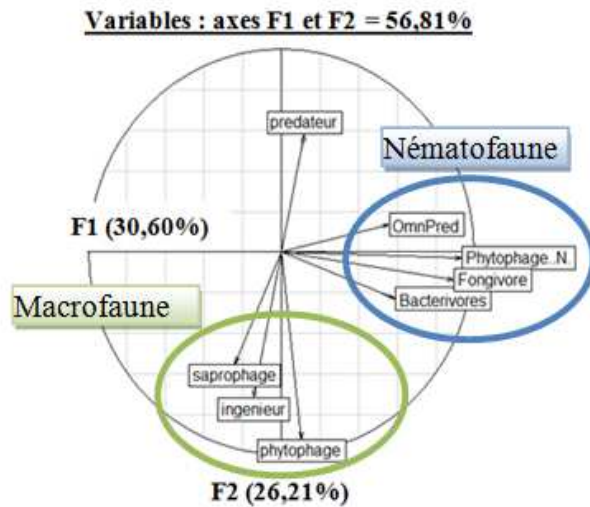
L'indice de maturité (MI), compris entre 2 et 5, augmente avec la stabilité environnementale. Il possède la valeur la plus élevée pour la date 12 comparé au traitement EFB3.

L'indice des voies de décomposition (NCR) tend vers 1 lorsque la voie majoritaire est d'origine bactérienne, et vers 0 lorsqu'elle est d'origine fongique. Pour l'ensemble des traitements la voie majoritaire de décomposition semble être d'origine bactérienne, à l'exception du traitement EFB12. Celui-ci est statistiquement inférieur aux traitements EFB1 et EFB3, et indique une voie de décomposition majoritairement d'origine fongique.

Le NCR\* diffère de l'indice NCR par la prise en compte des phytophages facultatifs (notamment de la famille Tylenchidae, famille la plus représentée) dans le calcul des voies majoritaires de décomposition de la matière organique. Les résultats sont similaires à ceux du NCR.

Les indices d'enrichissement (EI), de communauté basale (BI) et de nématodes phytophages (PPI) ne montrent pas de résultats significatifs.

### 5.3.3 Interactions macrofaune et nématofaune



Le cercle de corrélations existantes entre les groupes fonctionnels de macrofaune et de nématofaune montre peu de liens (Figure 22). L'inertie totale, c'est-à-dire la qualité de la représentation, reste faible (56,81 %).

**Figure 22 : Cercle des corrélations des groupes fonctionnels de macrofaune et de nématofaune**

La représentation des cercles de corrélations entre les groupes fonctionnels de macrofaune et de nématofaune en fonction des autres axes n'est pas présentée ici car elle n'apporte pas d'informations complémentaires.

## 5.4 Interactions entre les composantes physiques, chimiques et biologiques

### 5.4.1 Évaluation de la fertilité chimique

L'évaluation de la fertilité chimique des sols est basée sur le calcul de l'indice de qualité chimique des sols (CSQI) dont le calcul est décrit en détail dans les travaux de (Sharma et al. 2009). Dans le cadre de cette étude, les paramètres pris en compte dans l'évaluation de cette fertilité sont l'acidité réelle du sol (pH eau), la teneur en carbone organique (C org) et azote total (N tot), les teneurs en potassium total (K tot) et phosphore total (P tot), P assimilable calculé par la méthode de Bray (P bray), la capacité d'échange cationique (CEC), et les cations échangeables K, Ca, Mg et Na. Le principe du « more is better » signifiant que la valeur la plus élevée pour chacun des paramètres est considérée comme la meilleure, est appliqué pour l'ensemble des paramètres à l'exception du Na. Ce dernier fait l'objet du principe « less is better » (la valeur la plus faible pour ce paramètre est aussi la meilleure). Les scores respectifs appliqués aux différents paramètres sont tirés des mêmes travaux.

$$CSQI = \frac{\sum \text{scores linéaires} \times \text{Valeurs de score du paramètre respectif}}{\text{Somme totale des scores}}$$

Tableau 9 : Valeurs de l'indice CSQI pour chacun des traitements

	Traitements							Kruskal-Wallis
	Conv	1	3	6	12	18	24	
<b>CSQI</b>	0,39	0,74	0,71	0,56	0,57	0,68	0,63	0,041*

Le traitement « Conv » possède un indice de qualité chimique du sol significativement plus faible que les traitements EFB (Tableau 9). Par contre, pendant les deux ans qui suivent l'application de rafles, les variations du CSQI restent de faibles amplitudes et non significatives.

### 5.4.2 Les trois composantes du sol

Pour l'ensemble des Analyses Factorielles Multiples (AFM), la composante physique est représentée par cinq variables : la densité apparente, la stabilité des agrégats, les teneurs en sable, limon, argile ; la composante chimique est représentée par 15 variables : la teneur en eau (teneureau), le pH réel (pH eau) et résiduel (pH KCl), la teneur en carbone organique (C org) et en azote total (N tot), le rapport C/N (CN), les teneurs totales en potassium (K tot) et phosphore (P tot), la capacité d'échange cationique (CEC), les ions échangeables (Ca, Mg, K, Na, P Bray) et la saturation.

#### 5.4.2.1 Groupes taxonomiques de macrofaune et propriétés physico-chimiques

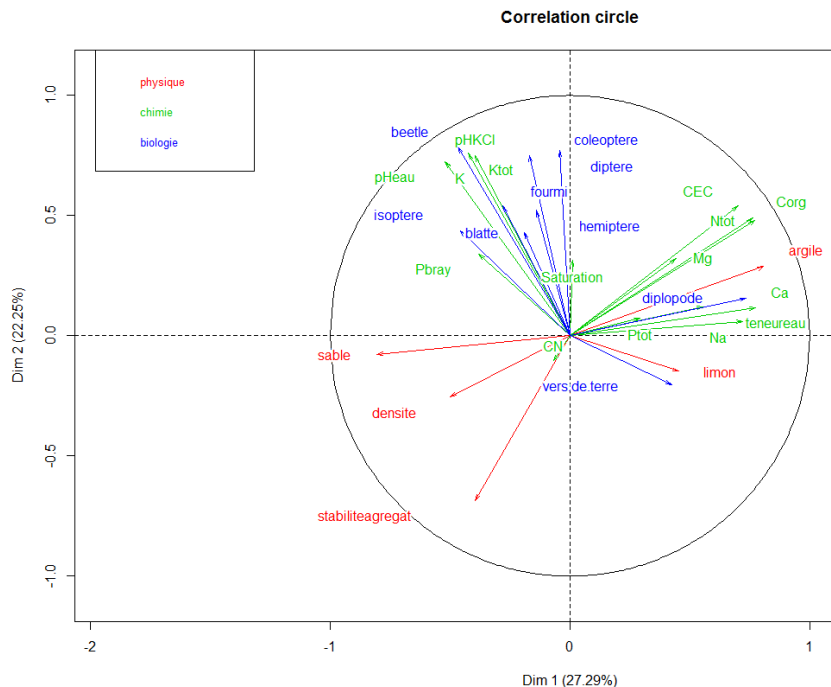
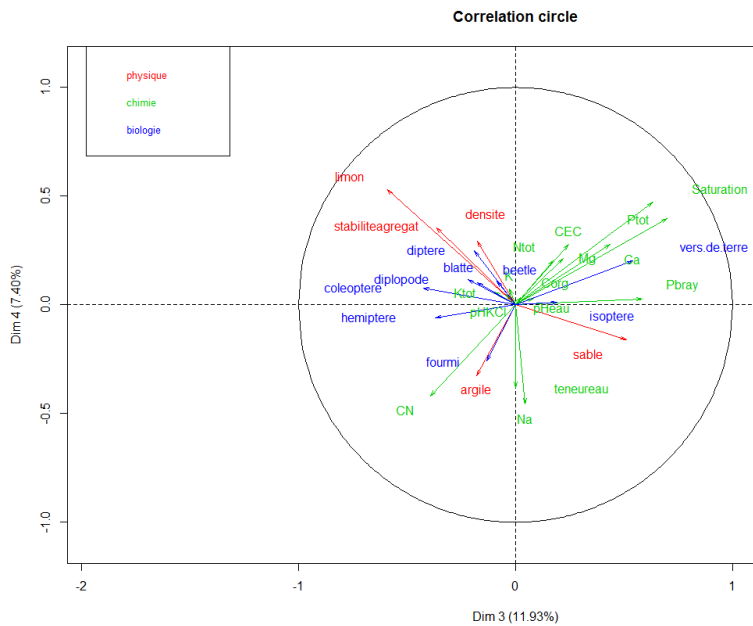


Figure 23 : AFM des groupes taxonomiques de macrofaune et des composantes physiques et chimiques

La réalisation de l'Analyse Factorielle Multiple (AFM) montre un lien existant entre la composante chimique et la composante biologique représentée par les 9 groupes taxonomiques de macrofaune (Figure 23). La composante biologique se projette sur l'axe 2 (pourcentage d'inertie de l'ensemble des variables biologiques : 43 %) ; la composante physique se projette sur l'axe 1 (39 % d'inertie) ; la composante chimique se projette sur les deux axes (axe 1 : 44 % ; axe 2 : 41 %). La composante biologique est principalement corrélée à la composante chimique. Une corrélation existe entre composante chimique et physique.

La majorité des groupes taxonomiques, à l'exception des diplopodes et des vers de terre, se projette sur l'axe 2, au même titre que les teneurs en potassium du sol (K tot : 0,759 ; K : 0,724) et le pH du sol (pH eau : 0,726 ; pH KCl : 0,749). Ces variables sont corrélées positivement entre elles. Le groupe des diplopodes se projette principalement sur l'axe 1 (0,737), au même titre que différents paramètres chimiques (N tot : 0,723 ; C org : 0,763 ; Ca : 0,775 ; Na : 0,721 ; CEC : 0,701) et physique (% argile : 0,809). Ces variables sont donc positivement corrélées entre elles. Le groupe des vers de terre se projette sur l'axe 3 et n'est pas corrélé aux autres variables biologiques (Figure 24).

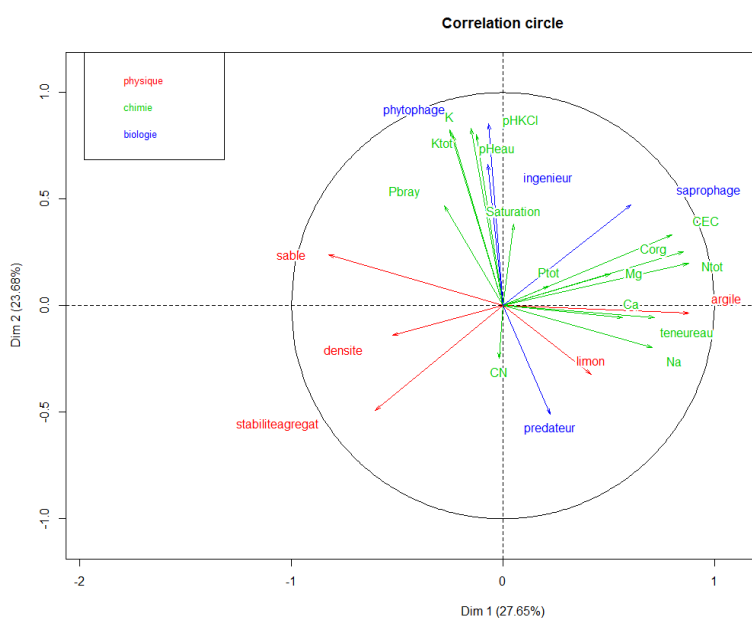


Le groupe taxonomique des vers de terre en se projetant sur l'axe 3 est davantage corrélé aux teneurs en phosphore du sol (P tot : 0,700 ; P bray : 0,584), ainsi qu'à la saturation (0,633). Il est inversement corrélé à la teneur en limon du sol (-0,591).

Figure 24 : AFM des groupes taxonomiques de macrofaune et des composantes physique et chimique par la prise en compte des 4 axes de l'AFM

#### 5.4.2.2 Groupes fonctionnels de macrofaune et propriétés physico-chimiques

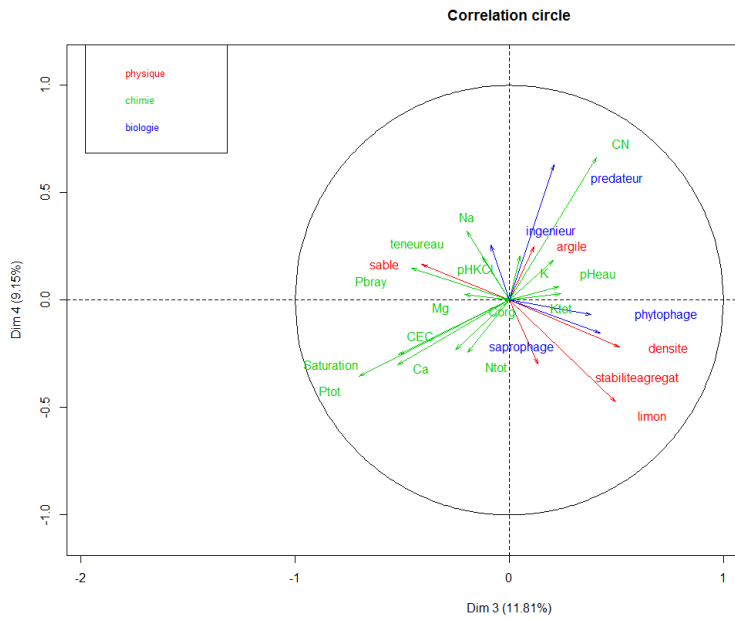
Au même titre que les groupes taxonomiques de macrofaune, les groupes fonctionnels se projettent principalement sur l'axe 2 (pourcentage d'inertie de la composante biologique : 48 %). La composante physique se projette sur l'axe 1 (47 %) ; la composante chimique se projette sur les axes 1 et 2, et est corrélée aux composantes physique et biologique.



Les groupes des phytophages et des ingénieurs du sol se projettent principalement sur l'axe 1 au même titre que les teneurs en potassium (K tot : 0,832 et K : 0,824) ainsi que le pH du sol (pH eau : 0,801 et pH KCl : 0,804) (Figure 25). Une corrélation positive existe entre ces variables. Les saprophages se projettent principalement sur l'axe 1, de même que plusieurs variables chimiques (C org : 0,877 ; N tot : 0,855 ; Ca : 0,715 ; Na : 0,708 ; CEC : 0,799) et physiques (% argile : 0,880). Les saprophages sont positivement corrélés à ces variables.

Figure 25 : AFM des groupes fonctionnels de macrofaune et des composantes physique et chimique





Les prédateurs sont mieux représentés par l'axe 4 (0,631) (Figure 26). De même que le rapport C/N (0,664).

Les prédateurs sont corrélés au rapport C/N.

Figure 26 : AFM des groupes fonctionnels de macrofaune et des composantes physiques et chimiques par la prise en compte de 4 axes de l'AFM.

#### 5.4.2.3 Groupes fonctionnels de nématodes et propriétés physico-chimiques

La nématofaune et la composante physique sont principalement projetées sur l'axe 2 et donc positivement

corrélées (Figure 27). Phytophages, bactérivores et fongivores se projettent principalement sur l'axe 1. Ils sont corrélés positivement à la densité apparente (0,617), à la stabilité des agrégats (0,579) ainsi qu'à la teneur en sable du sol (0,730). Ils sont inversement corrélés à la teneur en argile (-0,794), aux teneurs en N tot (-0,784), C org (-0,742), Ca (-0,825) et Na (-0,709).

Les omnivores et prédateurs se projettent sur l'axe 2. Ils sont inversement corrélés au phosphore disponible dans le sol (P bray : -0,708), ainsi qu'au teneur en potassium (K tot : -0,640 et K : -0,695) et au pH (pH eau : -0,767 et pH KCl : -0,821).

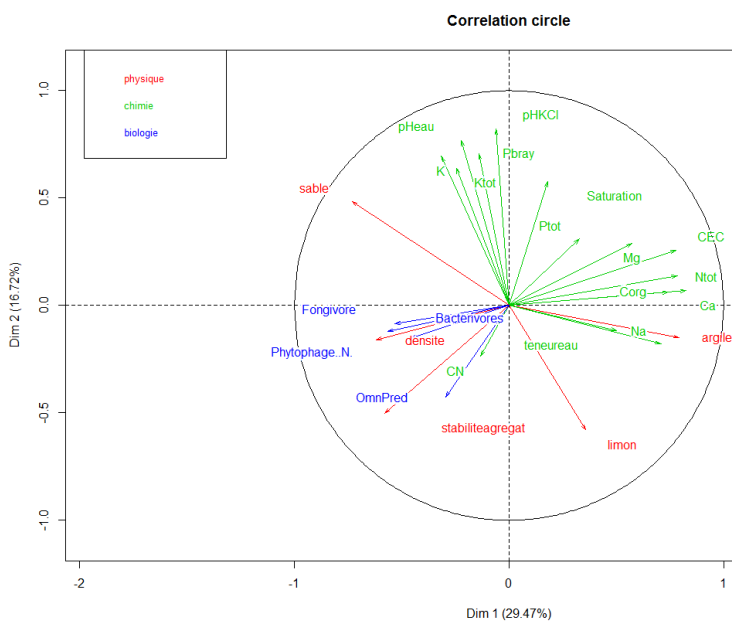
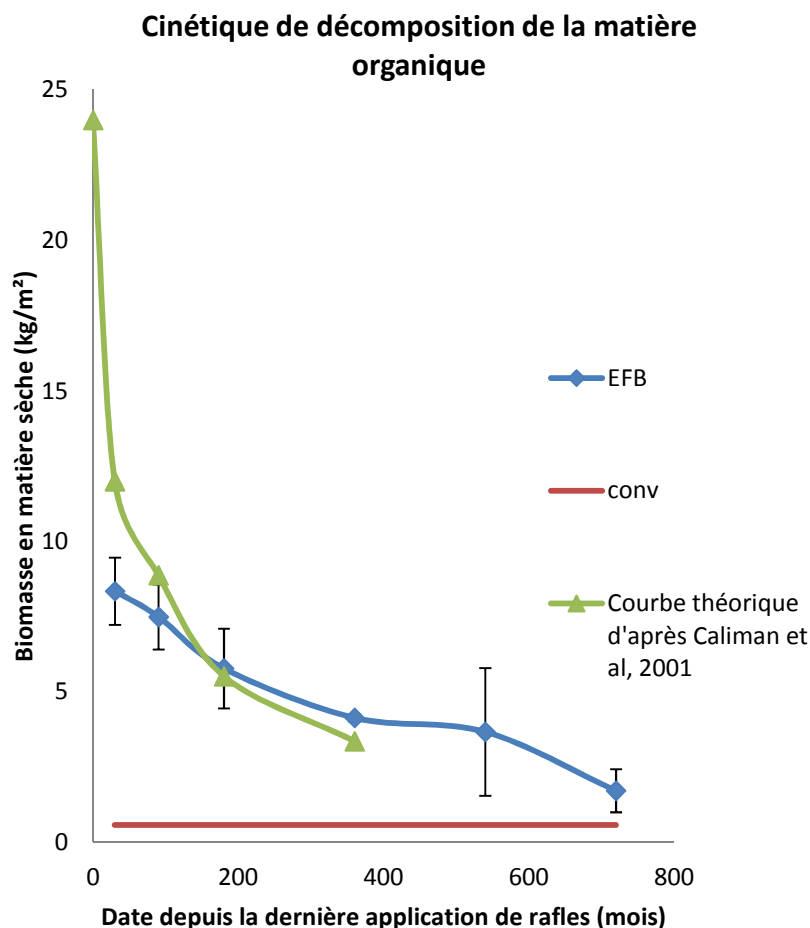


Figure 27 : AFM des groupes fonctionnels de nématodes et des composantes physique et chimique

## 5.5 La couverture du sol – cinétique de décomposition des rafles

### 5.5.1 Cinétique de décomposition des rafles



La décomposition des rafles est continue dès le moment d'apport avec un ralentissement à 360 jours (12 mois) (Figure 28). En l'absence d'apports de rafles, une couverture du sol est présente, de l'ordre de 0,600 kg/m<sup>2</sup> supposée présente sur l'ensemble des parcelles échantillonnées. Les pourcentages liés à la cinétique de dégradation des rafles dans les travaux de (Caliman et al. 2001b) sont utilisés pour construire une courbe théorique, avec une biomasse initiale de 24kg/m<sup>2</sup> en poids sec.

Figure 28 : Évolution de la biomasse de la litière en fonction du moment d'apport de l'EFB exprimée en biomasse de matière sèche par m<sup>2</sup>

### 5.5.2 Évolution de la composition chimique de la couverture du sol

Les résultats de la composition chimique des rafles semblent correspondre aux résultats obtenus dans la publication de (Caliman et al. 2001b).

## 6 Discussion

Le choix d'une **étude in situ**, sur blocs industriels, avec échantillonnage sur plusieurs parcelles disposées de façon aléatoire sur une plantation de plusieurs milliers d'hectares, présente l'avantage de donner une représentation de la réalité de terrain. En revanche, il introduit dans l'étude divers facteurs extérieurs d'hétérogénéité, liés aux modalités d'épandage, aux approximations sur les dates d'épandage ou encore aux apports complémentaires d'engrais (urée). Malgré cela, on arrive à mettre en évidence des différences, notamment en se concentrant sur l'horizon A0 où l'impact est maximum.

Dans le cadre de l'analyse de la variabilité temporelle du biote des sols entre deux applications d'engrais organique sous palmiers à huile, la **méthode TSBF** a été privilégiée. Celle-ci a été cependant adaptée concernant la profondeur et la définition des tranches de sol étudiées, comme la plupart des travaux qui s'y réfèrent (Barros et al. 2003; Cluzeau et al. 2012; Gilot et al. 1995). Cela a permis d'analyser l'épaisseur de la couche d'humus A0 en fonction des traitements : contrairement à l'hypothèse de départ, l'apport de rafles n'augmente pas l'épaisseur de la couche d'humus et ce à aucun point de la séquence étudiée. La matière organique fraîche apportée au sol peut subir deux modifications : rapide via la minéralisation en CO<sub>2</sub>, ou bien lente via une transformation en matière organique stable dans le sol (Schvartz et al. 2005), fonction en partie des teneurs en cellulose et lignine de l'apport (Annabi et al. 2011). L'augmentation de la teneur en lignine des résidus suite à la décomposition rapide des éléments les plus solubles (cellulose, protéines) entraîne un ralentissement de la vitesse de décomposition (Comte et al. 2013; Lim and Zaharah 2002) susceptible d'influencer les teneurs en carbone organique des sols. Les résultats de cette étude montrent une teneur en carbone organique dans l'horizon de sol A0 (ou horizon humique) bien supérieure dans les traitements EFB par rapport à « conv ». Cette supériorité est maximale et devient significative après 24 mois. Cette augmentation de la teneur en Corg, associée à celle observée de la teneur en argile, est cohérente avec l'hypothèse de la formation de complexes argilo-humique (CAH) responsable de la protection de la matière organique issue des phénomènes de décomposition (Comte et al. 2013). Cet enrichissement en argile peut également être influencé par l'activité des vers de terre, nombreux en fin de période. Une amélioration de la densité apparente est associée à l'augmentation de ces deux facteurs sur une période de deux ans.

Les apports de rafles participent également à une **augmentation de la Capacité d'Échange Cationique (CEC)**. La matière organique riche en charges négatives (Diacono and Montemurro 2010) s'accumulant dans le sol favorise les échanges de cations avec la solution du sol. Cette étude montre aussi que durant les trois mois suivant l'apport, l'augmentation de la CEC était associée à une saturation en cations supérieure à 100%. L'apport de rafles pourrait donc présenter un risque de lixiviation sauf si ces cations libres (notamment le K<sup>+</sup>) n'étaient pas rapidement absorbés par le palmier. C'est l'hypothèse à laquelle conduisent les travaux de (Caliman et al. 2001a) montrant qu'il n'y avait pas d'accumulation des cations (K<sup>+</sup>, Mg<sup>+</sup>) en profondeur au-delà de 70 cm.

L'apport de rafles semble se traduire les **premiers mois par une perturbation du milieu** : cette période est caractérisée par la prédominance des nématodes bactérivores (80% de l'abondance totale), les plus résistants aux perturbations environnementales (Sanchez-Moreno et al. 2011), vis-à-vis des nématodes fongivores (2 à 4%) malgré l'attrait de ces deux groupes pour les apports en matière organique (Villénave et al. 2010). Ceci est confirmé par les valeurs faibles de l'indice de structure (SI), et inférieures à celle du traitement « conv ». En ce qui concerne la macrofaune, les vers de terre semblent être les organismes les plus sensibles aux perturbations du milieu, comme l'ont décrit (Ayuke et al. 2011b). Malgré leur avantage compétitif vis-à-vis de la matière organique plus facilement décomposable (Ayuke et al. 2011a), ils n'apparaissent qu'à partir de la deuxième année, et présentent une abondance supérieure en conventionnel en comparaison des premiers mois de traitement. L'apport de rafles semble avoir un effet négatif à plus long terme sur la stabilité des agrégats. Le traitement conventionnel possède en effet les valeurs les plus élevées de stabilité des agrégats malgré des teneurs en Corg, en argile et en calcium inférieures au traitement EFB. L'application des rafles, en maintenant une certaine humidité du sol (Chiew and Shimada 2013) semble limiter la consolidation des agrégats qui elle semble positivement influencée par des conditions sèches (Caron et al. 1992). Ces perturbations du milieu se font se poser la question du mode et de la forme d'épandage des rafles réalisé à l'heure actuelle sous forme de paillis sur les parcelles les plus proches des usines de transformation (Yahya et al. 2010). L'emploi de compost intéresse de plus en plus de chercheurs notamment du fait de la réduction du volume des rafles jusqu'à 75 à 85% (Chiew and Shimada 2013; Saletes et al. 2004) qui participerait à une réduction des coûts de transport et de la durée d'épandage. Cette matière organique stable (Diacono and Montemurro 2010) limiterait les perturbations du milieu, et offrirait un débouché à plusieurs résidus d'usine (rafles, POME, dépôts de décantation) (Yahya et al. 2010).

Dans la plupart des publications tentant de comprendre l'effet d'apports répétés de rafles sur les propriétés physiques, chimiques ~~et/ou biologiques~~ du sol dans une plantation de palmiers à huile, la **cinétique de décomposition de cette matière organique** n'est pas expressément prise en compte. Les échantillonnages sont réalisés trois mois après l'application de rafles (Kheong et al. 2010), après décomposition totale (supposé à un an) (Abu Bakar et al. 2011) ou deux ans après (Lim and Zaharah 2002) sans caractériser précisément l'état d'avancement de cette décomposition. Une technique simple de « litter bag » expérimentée par (Caliman et al. 2001b), a permis de mesurer précisément la cinétique de la décomposition des rafles et la libération des éléments nutritifs dans le sol sur une période de 400 jours. (Lim et. Zaharah 2000) interviennent après épandage en plaçant sous plusieurs rafles, un filet permettant de les séparer des autres afin de permettre la mesure du poids sec tous les mois sur une période de 10 mois. Cela suppose que chaque rafle apportée possède les mêmes caractéristiques. Le rythme de décomposition est sujet à fluctuation, en fonction de l'environnement biologique et de la climatologie notamment. Dans le cas de cette étude en synchronie, l'échantillonnage étant réalisé sur une période de deux mois, aucune de ces deux techniques n'était envisageable. C'est pourquoi une courbe théorique de la cinétique de dégradation des rafles ~~a été construite~~, en s'appuyant sur les travaux de (Caliman et al. 2001b), à partir d'un apport initial de 60kg/m<sup>2</sup>, soit 24kg/m<sup>2</sup>

en poids sec avec 60% d'humidité en sortie d'usine (Singh et al. 1999). Le poids sec des rafles obtenu pour le premier traitement (1 mois) est donc estimé correspondre à 50% du poids initial ; La dégradation se poursuit ensuite à un rythme plus lent avec 14% du poids initial restant après 11 mois. Les deux courbes de décomposition des rafles, théorique et expérimentale, **présentent des écarts, notamment dans les trois premiers mois**. Différents éléments peuvent contribuer à ces écarts : 1) Un « bruit de fond » = Une litière indépendante des apports de rafles : la couverture du sol pour les traitements conventionnels donne une valeur moyenne de 600g/m<sup>2</sup> pris en compte lors de l'échantillonnage de la litière des traitements EFB ; 2) Une exposition variable aux conditions climatiques : l'échantillonnage de six traitements sur une période de deux mois, entraîne la prise en compte d'apports réalisés à différents moments au cours des deux années précédentes et donc soumis à des températures et à des précipitations variables ; 3) Des dates d'apports approximatives : L'échantillonnage sur des blocs commerciaux implique des incertitudes sur le moment exact d'application des rafles ; et cette imprécision a d'autant plus d'impact sur les premiers traitements. Chaque bloc mesure 30 ha, les apports sont donc réalisés sur plusieurs semaines, rang par rang. L'échantillonnage du mois 3 pourra correspondre à un apport de 3 mois  $\pm$  2 semaines ; 4) L'hétérogénéité de répartition des rafles lors de l'application ; 5) L'absence de données concernant les constituants des rafles en sortie d'usine pour chacun des traitements analysés dans cette étude : les divergences dans la cinétique de décomposition des rafles s'expliquent le plus souvent par des teneurs variables dans les principaux constituants des rafles à l'origine de différentes valeurs de rapport C/N (Lim et. Zaharah 2002).

Le **nombre d'échantillons analysés** est presque toujours un facteur limitant dans ce type d'étude. Concernant la macrofaune, chaque point d'extraction (profondeur de 15 cm, 2 horizons de sol, 4 personnes), représente une heure de travail. Suivi d'une heure d'identification à l'échelle de l'ordre au laboratoire. Cette technique longue et fastidieuse influence le nombre d'échantillons choisis. Basé sur les préconisations de la méthode TSBF (Clarke and Ainsworth 1993; Mathieu 2004), et en tenant compte des contraintes liées à l'échantillonnage en plantation commerciale, un nombre de 12 échantillons par traitement a été réalisé. Cependant l'importance de certains écart-types ne permet pas de conclure à la différence des moyennes malgré des tendances nettes. Un exemple concerne les populations de macrofaune possédant un mode de vie en colonies à gros effectifs (abondance en fourmis dans l'horizon A0). Ceci fait ressortir la nécessité d'augmenter le nombre de points d'échantillonnage pour mieux discriminer les traitements entre eux.

Les analyses biologiques ont permis de mettre en avant une abondance en macrofaune et nématofaune prédominante dans l'horizon de surface. Selon (Eglin et al. 2010) cela s'explique par des concentrations en matière organique et en racines plus élevées. De plus, l'apport de résidus organiques est considéré comme nourriture pour les organismes du sol (Lavelle and al. 2001; Tomich and al. 2011). **L'apport de rafles a entraîné une augmentation de la valeur de l'indice de Shannon en comparaison du traitement conventionnel, à l'origine d'une équitabilité de distribution des individus entre les taxons, donc d'un meilleur équilibre. De plus, une augmentation de l'abondance totale en macrofaune a été mesurée, caractérisée par une succession de trois phases. Une phase initiale 1, durant le premier semestre qui suit**

l'application, possède une abondance totale en macrofaune importante dominée par les fourmis et les coléoptères avec une poussée d'isoptères au 3<sup>ème</sup> mois ; une phase centrale 2 (12<sup>ème</sup> et 18<sup>ème</sup> mois) de transition durant laquelle une baisse en abondance totale se produit associée à un remplacement des populations de fourmis par celles de vers de terre ; une phase finale 3, deux ans après l'apport, avec de nouveau une augmentation de l'abondance totale caractérisée par une poussée de deux nouveaux groupes, les diplopodes et les dermaptères. Ces résultats confirment l'hypothèse de départ envisageant une évolution des groupes taxonomiques et fonctionnels de macrofaune dans l'intervalle entre deux applications de rafles. Les ingénieurs du sol (fourmis et vers de terre) représentent le groupe fonctionnel majoritaire dans tous les traitements, EFB et conventionnel. Le groupe des termites est peu présent dans les sols de Libo, malgré leur forte abondance démontrée dans les sols tropicaux (*Jeffery et al. 2010*). Les populations de nématodes ne suivent pas la même tendance. Les premiers mois suivant l'apport sont caractérisés par une baisse de l'abondance totale en nématodes du sol. Par la suite, les nématodes bactérivores sont prédominants sur l'ensemble des traitements, à l'origine d'une voie majoritaire de décomposition de la matière organique d'origine bactérienne (NCR tend vers 1), à l'exception du mois 12 dominé par les fongivores (NCR tend vers 0). La hausse des communautés de nématodes prédateurs fait suite à celle des autres groupes fonctionnels de nématodes et représentent un niveau trophique supérieur. **L'apport de rafles entraîne une baisse de l'indice de stabilité (MI) les trois mois suivants l'apport.** Ceci est cohérent avec les travaux de (Bongers and Ferris 1999) selon qui l'apport de matière organique stimule l'activité microbienne et fourni des ressources aux nématodes opportunistes à l'origine d'une baisse de l'indice de maturité (MI), suivi par une augmentation progressive.



**Cette analyse de la composante biologique ne sera cependant complète qu'avec l'étude des microorganismes qui représentent, après la macrofaune et la nématofaune, un troisième groupe majeur et complémentaire vis-à-vis du fonctionnement biologique des sols.**

La littérature propose quelques méthodes pour calculer des index multiparamétriques de la qualité du sol en recherchant chaque fois le meilleur compromis entre la simplicité de la mise en œuvre et la précision de la représentation en regard des multiples fonctions du sol (Karlen et al. 2001). Ces index prennent en compte les plus significatifs des paramètres physiques, chimiques et biologiques (Karlen et al. 2001; Ruiz et al. 2011; Sharma et al. 2009; Velasquez et al. 2007). Ils restent imparfaits à vraiment caractériser la qualité d'un sol et doivent toujours être considérés en valeur relative pour comparer des changements temporels ou des systèmes de cultures dans un environnement homogène (Karlen et al. 2001). Un exemple concerne **l'indicateur CSQI (Chemical Soil Quality Index) décrit par (Sharma et al. 2009)** permettant d'estimer la qualité chimique d'un sol, et basé sur 10 paramètres chimiques. Une augmentation de la valeur de ces paramètres, à l'exception du sodium, est considérée comme témoignant d'une meilleure fertilité chimique. **Cette étude a montré que l'apport de rafles permet d'améliorer la fertilité chimique globale du sol par rapport au traitement conventionnel.** La précédente étude sur la zone (Auriac 2012) a montré des valeurs équivalentes (entre 0,58 et 0,78) pour le traitement EFB et légèrement supérieures (entre 0,51 et 0,57) pour le traitement conventionnel.

Ces différences s'expliquent en partie par un nombre de répétitions supérieur dans le cas de cette étude (12) et réparties sur l'ensemble de la plantation.

Concernant la composante biologique des sols, celle-ci est maintenant reconnue comme un acteur à part entière de la fertilité des sols. La jeunesse des savoirs dans ce domaine et la rareté des données de référence rendent difficile l'interprétation des analyses. Comme le soulignent (Araujo et al. 2007) il n'y a pas de consensus sur l'interprétation des valeurs des indicateurs biologiques. Pour citer un exemple, (Araujo et al. 2007) relèvent qu'une forte activité microbienne n'est pas nécessairement un indicatif de qualité améliorée du sol et qu'il peut parfois, à l'inverse, être considéré comme un facteur négatif par l'accélération de la décomposition des déchets qu'il favorise, aux dépens de la constitution de stocks de matière organique stable dans le sol. Le challenge consiste à donner une représentation globale de la fertilité des sols en incluant les trois composantes physique, chimique et biologique. Cette étude participe d'un projet plus large dont l'un des objets est de **participer à construire des référentiels** concernant la richesse et l'abondance des groupes biologiques et de relier les valeurs indicatrices de certains paramètres biologiques à des variables explicatives telles que l'usage des terres, la géographie, le climat, les pratiques agricoles (Cluzeau et al. 2012). La construction de référentiels permet aussi de déterminer des valeurs seuils.

**Tableau 10 : Estimation qualitative de l'évolution des paramètres physiques, chimiques et biologiques par période comparé au traitement conventionnel. (\*)Période 1 : 1 à 6 mois ; Période 2 : 12 à 18 mois ; Période 3 : 24 mois ; Uniquement l'horizon A0. Cette estimation est basée sur une appréciation positive ou négative du paramètre. Pour le biote, une augmentation des populations est jugée positive « a priori ».**

Paramètres	Traitements		
	Période 1	Période 2	Période 3
Densité apparente	+	++	+++
Teneur en argile	+	++	+++
Carbone organique	+	++	+++
Azote total	+	+	++
pH eau	+++	+	=
Potassium total et disponible	+++	=	=
Calcium	+	++	+++
Saturation	+++	++	+
CEC	+	++	+++
CSQI	+	+	+
Abondance totale en macrofaune	+++	+	++
Fourmis (M)	+++	+	+
Coléoptère (M)	+++	+	++
Blatte (M)	+++	+	++
Isopète (M)	+++	+	=
Hémiptère (M)	+++	-	+
Diptère (M)	+++	=	++
Diplopode (M)	++	+	+++
Vers de terre (M)	-	++	+++
Larve de scarabée (M)	+++	+	=
Indice de Shannon	+	+	+
Abondance totale en nématofaune	+	++	++
Bactériovore (N)	+	++	+++
Fongivore (N)	-	++	++
Prédateur (N)	-	+	++
Omnivore (N)	-	=	+
Phytophage (N)	-	+	+
Indice de structure (SI)	-	+	+
Indice de maturité (MI)	-	+	+
Indice de voie de décomposition (NCR)	+	-	=

Il n'a pas été possible d'identifier un territoire préservé (forêt conservée) à proximité du site d'étude. Dans cette étude, c'est donc le traitement Conv qui sert de référence. Les données sont également comparées à celles disponibles dans la littérature (Annexe 10) par une comparaison en valeurs relatives et pour fournir les premières bases pour un futur

référentiel. Les mesures biologiques sont accompagnées de la caractérisation des propriétés physico-chimiques des sols dans un système de culture bien défini afin de former une « **banque de données** » qui servira de base à la construction du référentiel d'interprétation (ITAB 2002).

Le Tableau 10 permet de visualiser la **coévolution des paramètres physico-chimiques**

**et biologiques** de la fertilité des sols en fonction des trois périodes identifiées sur les deux ans qui suivent l'application de rafles. Cela permet d'apporter les premiers éléments caractéristiques du système étudié. Le traitement conventionnel possède les valeurs les plus faibles pour l'ensemble des paramètres chimiques. Il est



convenu dans la bibliographie, que l'augmentation en valeurs de ces paramètres chimiques, se traduit par une augmentation de la fertilité chimique du sol (Sharma et al. 2008). La baisse de densité apparente et l'augmentation de la teneur en argile entrant dans la formation du complexe argilo humique agit en faveur d'une meilleure structure du sol. Une analyse plus précise de la minéralogie des argiles permettrait de confirmer ce point. Bien qu'il soit difficile d'associer certains paramètres biologiques à la fertilité du sol, il est possible de trouver des coévolutions entre les paramètres physiques, chimiques et biologiques. La macrofaune du sol est favorisée le premier semestre suivant l'apport de rafles. Il semble y avoir une coévolution entre les abondances en fourmis, coléoptères, isoptères et larves de scarabée, et les paramètres chimiques de pH, de teneur en potassium et de saturation. A l'inverse, les vers de terre et les diplopodes semblent suivre l'évolution des teneurs en carbone organique, azote total, argile, calcium et CEC. Au même titre que les vers de terre, la nématofaune du sol (autre que le groupe des bactérivores) est défavorisée le premier semestre suivant l'apport de rafles. Le traitement conventionnel possède globalement des valeurs plus faibles en abondance globale de la macrofaune et de la nématofaune. En associant les données de ce tableau aux résultats issus des AFM, **d'autres corrélations** peuvent être mises en avant. Ainsi, la macrofaune du sol est davantage corrélée à la composante chimique. La majeure partie de ces groupes taxonomiques est corrélée aux teneurs en potassium (disponible et totale) et au pH (pH eau et pH KCl), du fait des propriétés des rafles apportées au sol. Les vers de terre et les diplopodes évoluent indépendamment des autres groupes taxonomiques. Les diplopodes semblent liés à l'ensemble des constituants du complexe argilo-humique. La nématofaune est corrélée principalement à la composante physique du sol : bactérivores, fongivores et phytophages sont positivement corrélés à la densité apparente, à la teneur en sable, et inversement corrélés à la teneur en argile. Les nématodes vivent dans le film d'eau qui entoure les particules de sol, en contact direct avec leur environnement (villenave 2013). Les omnivores et prédateurs sont influencés par quelques paramètres chimiques dont les teneurs en phosphore, potassium et le pH. Aucun lien n'a été mis en évidence entre les populations de macrofaune et celles de nématofaune. (Boyer and Lavelle 1998) (Chapuis-Lardy et al. 2010) ont mis en avant des interactions à l'échelle de l'espèce. Lorsque cette étude, à une échelle plus large, s'intéresse aux ordres taxonomiques. Cette étude est trop globale pour mettre en évidence ce genre de lien qui relève probablement d'une approche laboratoire.

L'**étude précédente** menée par (Auriac 2012) sur la zone, permet d'avoir une vision plus globale par une analyse spatio-temporelle du biote des sols de Libo. Un exemple concerne les populations de vers de terre. L'apport de rafles fraîches entraîne une « disparition » des vers de terre qui ne réapparaissent que la deuxième année et qui, selon **Quentin (2012)** serait plus gros (changement dans les groupes trophiques ?). Ces vers de terre semblent également être attirés par la zone désherbée (C) trois mois après l'application des rafles probablement lié au développement de la rhizosphère suite à l'apport. Il est possible de supposer une migration de certains groupes de vers de terre liée à un apport récent de rafles vers une zone considérée plus stable. Ces deux études forment les bases dans la compréhension de la fertilité des sols sous palmiers à huile.



## 7 Conclusion et perspectives

---

Dans le cadre de la recherche de l'optimisation économique et environnementale de la fertilisation minérale et organique, un focus est donné depuis quelques années à l'impact de ces pratiques agricoles sur la composante biologique des sols. Celle-ci a longtemps été laissée de côté du fait de sa complexité d'étude liée au manque d'informations et à la grande variabilité de résultats. Les variations spatio-temporelles des paramètres biologiques montrent la nécessité de travailler à l'acquisition de référentiels construits dans différents contextes paysagers, et au développement de bioindicateurs de la qualité des sols. L'intérêt de l'étude de la faune du sol réside dans le grand éventail de fonctions concernées. Le maintien de cette biodiversité participerait ainsi à une meilleure résistance et résilience aux modifications du milieu. Suite au Malaysian Quality Air Regulation de 1978, un nouvel apport organique est appliqué sur les plantations de palmiers à huile. Le manque d'informations quant à l'impact de ces rafles sur la composante biologique des sols en a fait un système d'étude intéressant.

L'hypothèse selon laquelle les composantes physico-chimiques et biologiques de la fertilité des sols varient au cours du temps entre deux applications de rafles est validée. Et ces variations sont quantifiées et caractérisées : elles conduisent à discerner trois périodes au cours des deux années qui suivent une application de rafles. Cette étude a montré que cet apport organique permettait une amélioration de la plupart des indicateurs physico-chimiques de la fertilité des sols, pour certains transitoires (K, pH, Saturation) et pour d'autres progressifs sur les deux années (densité apparente, N, CEC, Ca, Mg, Corg). Cette amélioration se traduit par une supériorité de l'indice CSQI (Chemical Soil Quality Index) quelque soit le délai après l'application de rafles, en comparaison du traitement conv. Une forte augmentation de la richesse en macrofaune (abondance d'individus) et de la richesse taxonomique (8 taxons en conv. contre 10 à 14 sous EFB) a également pu être observée. Celle-ci se traduit les premiers mois par une augmentation des populations de fourmis, coléoptères, isoptères et larves de scarabées (abondance multipliée par 7,5 à 3 mois en comparaison du conv). S'ensuit un enrichissement en vers de terre et en diplopodes au cours de la deuxième année suivant l'apport (biomasse des invertébrés multipliée par 20 à 18 mois en comparaison du conv). Ce résultat est en cohérence avec les données enregistrées par **Quentin (2012)** sur la zone P (rafles depuis 3 mois) et zone PC (rafles depuis 27 mois). Enfin, une forte augmentation de la richesse de la nématofaune au cours de la deuxième année a pu être observée (abondance globale multipliée par cinq), après une dépression consécutive à l'apport de rafles et qui concerne tous les groupes autres que les nématodes bactérivores. L'analyse de la structure de la chaîne trophique du sol par la mise en regard de l'indice de structure et l'indice d'enrichissement illustre une nette perturbation pendant le premier trimestre suivant l'application de rafles.

Sur les 17 groupes taxonomiques échantillonnés au cours de cette étude, 9 participent directement à mesurer la variabilité temporelle : fourmis, vers de terre et coléoptères représentent 80 % des individus en conv. et 67 % en moyenne en traitement EFB. Également les blattes, isoptères, hémiptères, diptères, diplopodes et larves de scarabées.

Concernant la composante biologique (macrofaune invertébrée et nématofaune), il est très clair que l'impact de l'application de rafles est le plus fortement exprimé dans l'horizon humique A0, même si l'effet se fait également sentir dans l'horizon A1 sur la population d'isoptères au cours de la première année et sur celle des vers de terre et des diplopodes en fin de deuxième année. Si l'épaisseur de cet horizon A0 (4 cm) n'est pas affectée ici par les traitements, par contre sa richesse chimique et biologique l'est fortement. L'hypothèse selon laquelle l'apport de rafles modifie les composantes physico-chimiques et biologiques dans l'horizon de surface est validée.

L'ensemble de ces résultats conduisent à proposer quelques points d'amélioration pour les prochaines études réalisées sur la zone.

Un premier point concerne la **réduction du nombre de dates** prises en compte dans la chronoséquence, à quatre dates. Le regroupement des variables physico-chimiques et biologiques influencées par le traitement en trois périodes de temps met en avant la possibilité de ne retenir que trois dates (au lieu de six) qui suffiraient à visualiser la variabilité temporelle. De plus, les changements importants se produisant entre la première période (1<sup>er</sup> semestre) et la seconde (12<sup>ème</sup> et 18<sup>ème</sup> mois) montre l'intérêt d'une date supplémentaire intermédiaire (exemple du mois 9) qui permettrait d'identifier avec plus de précision cette zone de transition.

Un second point concerne un **focus sur l'horizon de sol superficiel A0**. L'horizon de sol A1, non sans intérêt, montre des effets plus faibles de l'apport de rafles qui ne permettent pas de faire ressortir des tendances en fonction des traitements. De plus, **neufs groupes taxonomiques de macrofaune** participant directement à mesurer la variabilité temporelle semblent suffisants sur les 17 identifiés, avec un risque faible de pertes d'informations. Ce gain de temps et d'argent ouvrirait la possibilité à une **augmentation du nombre d'échantillons** réalisés par traitement afin de réduire les écart-types associés à certaines populations de macrofaune, et de pouvoir ainsi davantage différencier les traitements entre eux. L'ensemble des paramètres physiques et chimiques ont aidés à la compréhension des phénomènes intervenant dans le sol.

Ces conclusions sur la variabilité temporelle du biote des sols sous palmiers à huile avec apports de rafles viennent compléter celles obtenues l'année précédente sur la zone concernant la variabilité spatiale. La macrofaune et la nématofaune du sol sont sensibles aux modifications de leur environnement. La présence de niches écologiques liée à l'organisation de la parcelle élémentaire ainsi que les changements temporels liés aux apports de rafles sur l'abondance des groupes taxonomiques et fonctionnels de macrofaune, et trophiques de nématofaune en témoignent. Malgré la complexité de ces variations spatio-temporelle, plusieurs organismes pourraient représenter des bioindicateurs intéressants de la qualité des sols de Libo : les vers de terre facilement échantillonnables, leur sensibilité à l'environnement (rafles fraîches, zone désherbée) en fait un bioindicateur intéressant sur la zone de Libo ; Les indices nématofauniques apportent également des informations complémentaires sur la stabilité du milieu mais également sur les voies de décomposition de la matière organique. Le rôle des autres groupes taxonomiques de macrofaune sous rafles restent à identifier afin de déterminer l'impact des activités humaines et des différentes techniques de gestion du sol sur l'état biologique des sols, l'un des piliers de la qualité des sols.

## Liste des sigles et abréviations

<b>A0</b>	Horizon superficiel de sol composé de matière organique et minérale et de couleur sombre
<b>A1</b>	Horizon de sol situé directement sous l'horizon A0 et de couleur marron clair
<b>ACP</b>	Analyse en Composante Principale
<b>AFM</b>	Analyse Factorielle Multiple
<b>ANOVA</b>	ANalysis Of VAriances
<b>BI</b>	Basal Index (Indice de communautés basales de nématodes)
<b>Ca</b>	Teneur en Calcium des sols
<b>CI</b>	Channel Index (basé sur la présence de nématodes colonisateurs et/ou persistants)
<b>CIRAD</b>	Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
<b>CEC</b>	Capacité d'Échange Cationique
<b>Corg</b>	Carbone Organique des sols
<b>CSQI</b>	Chemical Soil Quality Index
<b>C/N</b>	Rapport de la teneur en Carbone (C) sur la teneur en Azote (N)
<b>EFB</b>	Empty Fruit Bunch
<b>EI</b>	Enrichment Index (Indice d'Enrichissement des communautés de nématodes)
<b>FFB</b>	Fresh Fruit Bunch
<b>GAR</b>	Golden Agri-Resources
<b>K</b>	Teneur en Potassium des sols
<b>KCl</b>	Chlorure de Potassium
<b>Ktot</b>	Teneur en Potassium totale des sols
<b>Mg</b>	Teneur en Magnésium des sols
<b>MI</b>	Maturity Index (Indice de maturité des communautés de nématodes)
<b>MO</b>	Matière Organique
<b>Ntot</b>	Teneur en Azote totale des sols
<b>Na</b>	Teneur en Sodium des sols
<b>NCR</b>	Nematode Channel Ratio (Indice des Voies de Décomposition)
<b>ONG</b>	Organisation Non Gouvernementale
<b>Pbray</b>	Phosphore disponible dans le sol mesuré par la méthode Bray
<b>pH eau (ou réel)</b>	Mesure l'acidité ou la basicité d'un sol
<b>pH KCl (ou résiduel)</b>	Acidité potentielle minimale d'un sol
<b>PPI</b>	Plant-Parasitic Index (Indice des Nématodes Phytophages)
<b>Ppm</b>	Partie Par Million (unité de mesure)
<b>PT SMART Tbk</b>	PT Sinar Mas Agro Resources and Technology Tbk
<b>Ptot</b>	Teneur en Phosphore totale des sols
<b>RSPO</b>	Roundtable on Sustainable Palm Oil (table ronde sur l'huile de palme durable)
<b>SI</b>	Stability Index (Indice de Stabilité des communautés de nématodes)
<b>Smart-RI</b>	Sinar Mas Agribusiness Resources and Technology Research Institute
<b>TSBF</b>	Tropical Soil Biology and Fertility
<b>UPR</b>	Unité Propre de Recherche

## Liste des annexes

---

Annexe 1 : Site d'expérimentation .....	53
Annexe 2 : Wet sieving apparatus .....	54
Annexe 3 : Tableau d'échantillonnage .....	56
Annexe 4 : Planning du stage.....	57
Annexe 5 : Composante physique.....	58
Annexe 6 : Composante chimique .....	59
Annexe 7 : Composante biologique –Macrofaune.....	60
Annexe 8 : Composante biologique - Nématofaune .....	66
Annexe 9 : Litière et couverture du sol.....	73
Annexe 10 : Références bibliographiques en relation avec les apports de matière organique en palmeraies .....	74



*Annexe 1 : Site d'expérimentation*

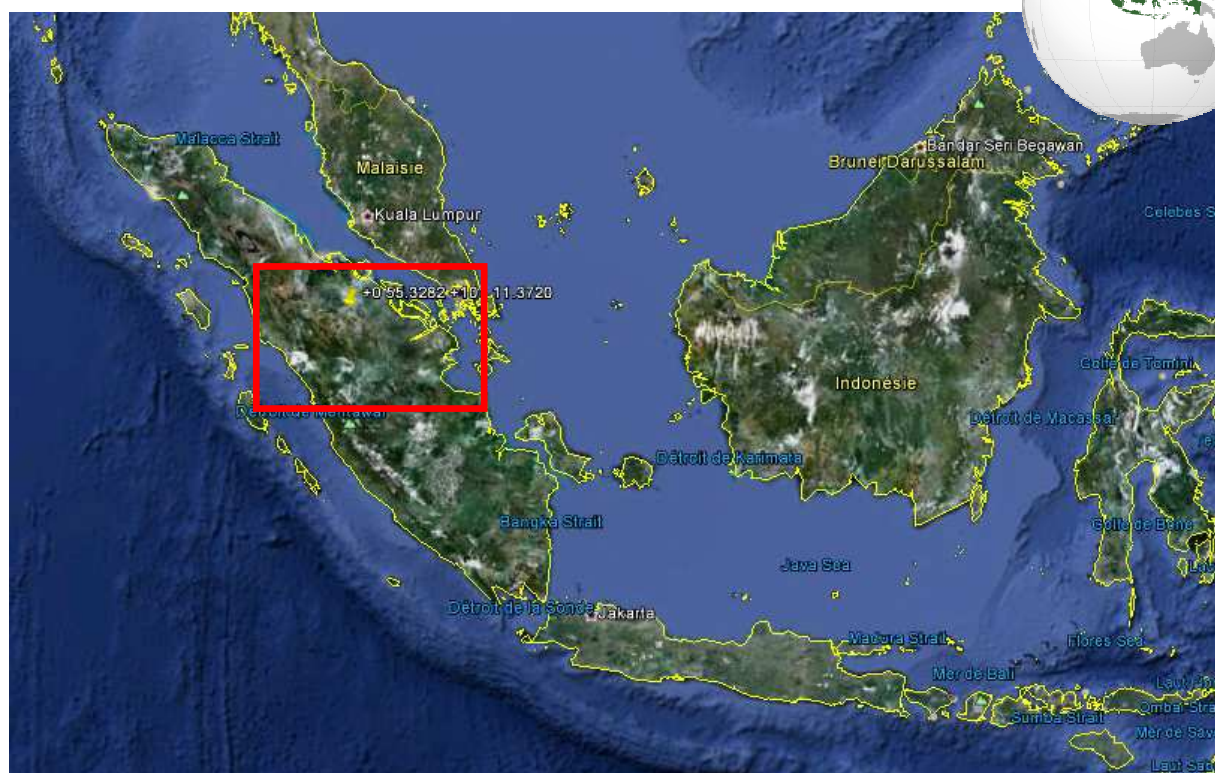


Figure 29 : Indonésie, île de Sumatra, Province de Riau (sous Google earth)

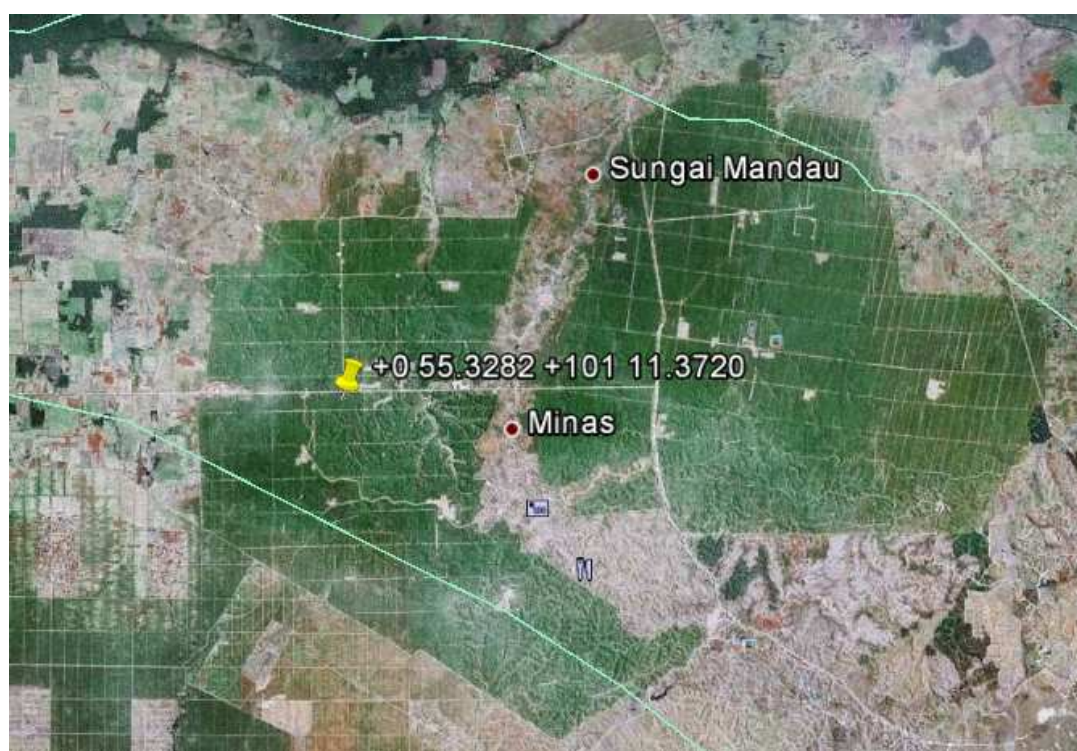


Figure 30 : Coordonnées GPS du site d'expérimentation SMARTRI (sous Google earth)

## *Annexe 2 : Wet sieving apparatus*



Le « wet sieving apparatus » est utilisée pour la détermination de la stabilité des agrégats de sols, c'est-à-dire la résistance de la structure du sol contre les forces destructives mécaniques ou physico-chimiques (Eijkelkamp 2008).

### Procédure :

1. Peser 4,0 grammes d'agrégats secs de taille 1 à 2mm et les placer dans le tamis
2. Pré humidifier les agrégats. Suivant la taille des échantillons, les laisser reposer de 5 à 10 minutes avant de les plonger dans l'eau
3. Placer les tamis sur le porte tamis
4. Placer les pots numérotés sous les tamis
5. Mettre le porte tamis en position « build-in stop »
6. Mettre de l'eau distillée dans les pots, en quantité suffisante pour recouvrir complètement les agrégats. L'eau peut être ajoutée au niveau des ouvertures situées sur le porte-tamis. Il est important que pendant le tamisage les échantillons soient continuellement submergés (il faut ajouter suffisamment d'eau)
7. Placer le porte tamis en position de fonctionnement en le positionnant sur le deuxième trou de la tige centrale.
8. Vérifier si l'interrupteur principal est en position « Off »
9. Brancher l'appareil
10. Démarrer l'instrument en mettant l'interrupteur principal sur la position « 3 min » et laisser le porte tamis monter et descendre pendant 3min ( $\pm 5s$ ) (Battement = 1,3cm ; à peu près 34 fois par minutes). À la fin du cycle, le moteur s'arrête automatiquement
11. Mettre le porte tamis en position « égouttage » en le replaçant sur le trou supérieur. Quand il n'y a plus d'eau s'égouttant des tamis, récupérer les pots numérotés contenant les particules
12. et les fragments d'agrégats séparés des agrégats et qui ont passé les tamis, et les mettre sur un plateau
13. Remplacer un nouveau jeu de pots numérotés



Ouvertures

14. Remplir les pots avec une solution dispersive (contenant 2g de sodium hexamétaphosphate / L pour les sols avec un pH basique et 2g de NaOH / L pour les sols acides). Pour la procédure de remplissage voir les points 4 et 5
15. Mettre le porte tamis en position de fonctionnement (deuxième trou)
16. Lancer le moteur en plaçant l'interrupteur en position « Continue » et poursuivre le tamisage jusqu'à ce qu'il ne reste que des particules de sables (et des fragments de racines) dans les tamis. Si certains agrégats restent stables après 5 à 8 minutes de tamisage, arrêter l'instrument (position « Off » de l'interrupteur) et les frotter sur le tamis avec une baguette à pointe arrondie jusqu'à ce qu'ils soient désintégrés.
17. Continuer le tamisage jusqu'à ce que les particules de tailles inférieures aux mailles du tamis soient passées au travers.

Disperser les agrégats peut prendre un certain temps (plus la quantité d'argile est grande, plus cela prend du temps). Il n'y a pas de durée de référence

18. Mettre l'interrupteur en position « Off » et placer le porte tamis en position « égouttage ». Quand il n'y a plus de solution dispersante s'égouttant des tamis, récupérer les pots et les mettre sur un plateau (différent du premier). Ces pots contiennent les particules des agrégats stables, exception faite des particules de sable trop large pour passer les mailles
19. Placer les pots dans un four à convection à 110°C jusqu'à ce que l'eau (et la solution dispersante) soit entièrement évaporée
20. Peser le poids de chaque pot une fois l'évaporation complète : en soustrayant le poids de chaque pot au poids final, ce qui permet d'obtenir le poids des agrégats. Dans les pots avec la solution dispersante, il reste 0,2g de solution dispersante avec les agrégats, qu'il faut également soustraire

La fraction stable est égale au poids des agrégats obtenus avec la solution dispersante divisé par la somme des poids des agrégats obtenus avec l'eau et la solution dispersante

*Annexe 3 : Tableau d'échantillonnage*

**Tableau 11 : Détails du nombre d'échantillons en fonction des différentes analyses**

	<b>Echantillons pour mesure biomasse</b>	<b>Echantillons pour analyse macrofaune</b>	<b>Echantillons pour analyse nématodes</b>	<b>Echantillons pour analyses chimiques</b>	<b>Echantillons pour analyses physiques</b>
EFB (litière)	X			X	
Horizon A0		X	X	X	X
Horizon A1		X	X	X	X
<b>Nombre d'échantillons</b>	<b>84</b>	<b>168</b>	<b>42</b>	<b>63</b>	<b>168</b>
Dispositif d'échantillonnage	3 répétitions	3 répétitions 2 horizons	3 répétitions 2 horizons	3 répétitions 3 horizons	3 répétitions 2 horizons
	4 parcelles élémentaires	4 parcelles élémentaires	1 échantillon composite de 4 parcelles élémentaires	1 échantillon composite de 4 parcelles élémentaires	4 parcelles élémentaires
	7 traitements	7 traitements	7 traitements	7 traitements	7 traitements



Annexe 4 : Planning du stage

	Montpellier		Libo / Indonésie			Montpellier	
	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUILLET	AOÛT	
Rapport de stage	Bibliographie / Contexte et problématique			Matériels et Méthodes		Fin de rédaction du rapport	
Macrofaune		Essais prélèvements Choix parcelles Validation protocole		Prélèvements et identification	Analyse des résultats		
Nématofaune			Prélèvements et envoi en France				Analyse des résultats
Chimie			Prélèvements séchage et analyse au laboratoire		Analyse des résultats		
Physique			Prélèvements pour stabilité des agrégats	Prélèvement pour densité apparente	Analyse des résultats		

### Annexe 5 : Composante physique

Valable pour l'ensemble des tableaux de l'annexe 5 (Composante physique) :

- *H* : horizon de sol (A0 et A1)
- : valeur de la statistique de test pour laquelle il existe des différences significatives entre les traitements avec le test non paramétrique de Kruskal Wallis suivi d'un test bilatéral.
- Les écartypes correspondent à l'erreur standard

**Tableau 12 : Densité apparente et Stabilité des agrégats pour les horizons de sol A0 et A1 en fonction du traitement**

H		Traitements							Kruskal - Wallis
		Conv.	1	3	6	12	18	24	
A0	Densité apparente	1,23 <sup>a</sup>	1, 21 <sup>ac</sup>	1,05 <sup>ac</sup>	1,09 <sup>ac</sup>	0,94 <sup>abc</sup>	0,88 <sup>abc</sup>	0,61 <sup>b</sup>	< 0,001*
		±0,06	±0,11	±0,18	±0,17	±0,23	±0,18	±0,01	
	Stabilité des agrégats	65,63	32,4	27,78	48,6	37,19	26,58	33,45	0,030*
		±1,74	±4,74	±2,91	±5,55	±0,90	±7,66	±8,67	
A1	Densité apparente	1,13 <sup>ab</sup>	1,22 <sup>a</sup>	1,24 <sup>a</sup>	1,38 <sup>a</sup>	1,19 <sup>a</sup>	1,29 <sup>a</sup>	0,89 <sup>b</sup>	< 0,001*
		±0,03	±0,11	±0,11	±0,03	±0,08	±0,11	±0,03	
	Stabilité des agrégats	36,94	26,36	24,66	37,17	29,36	41,93	29,46	0,411
		±8,36	±3,47	±2,97	±2,77	±1,92	±11,21	±8,31	

**Tableau13 : Textures pour les horizons de sol A0 et A1 en fonction du traitement**

H	Texture	Traitement							ANOVA
		conv	1	3	6	12	18	24	
A0	Sable (%)	87	85,3	85,3	82,7	84,3	83	76,7	0,064
		±1,2	±2,0	±2,0	±2,8	±3,2	±0,6	±1,3	
	Limon (%)	8	7	7	10,7	8	8,3	10	0,726
		±1,0	±1,2	±1,2	±3,2	±2,5	±1,5	±1,0	
	Argile (%)	5,0 <sup>c</sup>	7,7 <sup>ac</sup>	7,7 <sup>ac</sup>	6,7 <sup>ac</sup>	7,7 <sup>ac</sup>	8,7 <sup>b</sup>	13,3 <sup>a</sup>	< 0,001*
		±0,6	±0,9	±0,9	±0,3	±0,7	±1,2	±0,3	
A1	Sable (%)	79,3	77	77	79,3	82,7	80	77,3	0,233
		±1,3	±0,1	±1,0	±0,9	±1,9	±1,0	±3,2	
	Limon (%)	9,3	7,7	7,7	10,7	8	10,3	15	0,146
		±1,5	±0,9	±0,9	±2,2	±1,5	±1,2	±3,5	
	Argile (%)	11,3	15,3	15,3	10	9,3	9,7	7,7	0,032*
		±2,7	±1,5	±1,5	±2,3	±0,3	±1,3	±0,7	

## Annexe 6 : Composante chimique

Tableau 14 : Analyse des principaux éléments chimiques du sol pour les horizons de sol A0 et A1 en fonction du traitement

H	Chimie sol	Traitement							ANOVA
		conv	1	3	6	12	18	24	
A0	C org (%)	0,95 <sup>b</sup>	2,18 <sup>ab</sup>	1,66 <sup>ab</sup>	1,55 <sup>ab</sup>	1,87 <sup>ab</sup>	2,15 <sup>ab</sup>	3,08 <sup>a</sup>	0,010*
		±0,13	±0,32	±0,19	±0,04	±0,26	±0,18	±0,65	
	N tot (%)	0,07	0,15	0,13	0,12	0,11	0,19	0,22	0,058
		±0,01	±0,02	±0,01	±0,01	±0,01	±0,03	±0,07	
	pH eau	5,2 <sup>d</sup>	7,3 <sup>ab</sup>	7,4 <sup>a</sup>	6,3 <sup>bc</sup>	6,0 <sup>bcd</sup>	5,3 <sup>cd</sup>	5,4 <sup>cd</sup>	<0,001*
		±0,1	±0,1	±0,2	±0,4	±0,1	±0,2	±0,2	
	pH KCl	4,3 <sup>b</sup>	6,1 <sup>ac</sup>	6,6 <sup>a</sup>	5,6 <sup>ad</sup>	5,3 <sup>bcd</sup>	4,8 <sup>bd</sup>	4,7 <sup>bd</sup>	<0,001*
		±0,1	±0,2	±0,2	±0,4	±0,1	±0,2	±0,1	
	P (ppm)	258	311	260	303	281	813	269	0,722
		±175	±80	±37	±75	±124	±630	±132	
	K (ppm)	44 <sup>b</sup>	2221 <sup>a</sup>	1562 <sup>a</sup>	349 <sup>b</sup>	95 <sup>b</sup>	62 <sup>b</sup>	103 <sup>b</sup>	<0,001*
		±5	±421	±338	±218	±9	±3	±14	
	Pbray	69	71	82	70	64	45	22	0,57
		±40	±8	±20	±34	±11	±14	±4	
	CEC	2,84	6,57	6,26	4,67	5,1	8,04	9,19	0,057
		±0,36	±0,52	±1,73	±0,25	±0,32	±1,72	±2,27	
	Ca (me/100g)	0,82	0,89	1,89	1,92	2,09	3,93	3,49	0,023*
		±0,23	±0,21	±0,51	±0,27	±0,23	±1,21	±0,90	
A1	Mg (me/100g)	0,33	0,92	1,46	1,2	1,63	1,67	1,44	0,108
		±0,07	±0,17	±0,22	±0,24	±0,09	±0,61	±0,45	
	K (me/100g)	0,11 <sup>b</sup>	4,73 <sup>a</sup>	3,28 <sup>a</sup>	0,94 <sup>b</sup>	0,23 <sup>b</sup>	0,16 <sup>b</sup>	0,29 <sup>b</sup>	<0,001*
		±0,01	±0,40	±0,57	±0,59	±0,02	±0,01	±0,04	
	Na (me/100g)	0,06	0,05	0,06	0,06	0,06	0,07	0,08	0,081
		±0,003	±0,003	±0,003	±0,003	±0,01	±0,01	±0,00	
	Saturation	45,3 <sup>b</sup>	100,7 <sup>ab</sup>	124,3 <sup>a</sup>	87,0 <sup>ab</sup>	78,7 <sup>ab</sup>	70,7 <sup>ab</sup>	57,3 <sup>ab</sup>	0,027*
		±4,7	±6,2	±32,6	±12,9	±0,3	±12,5	±0,9	
	C org (%)	1,39	1,52	1,51	1,51	1,74	1,81	2,55	0,259
		±0,05	±0,23	±0,27	±0,14	±0,25	±0,44	±0,58	
	N tot (%)	0,08	0,09	0,1	0,1	0,11	0,14	0,15	0,599
		±0,01	±0,01	±0,01	±0,01	±0,02	±0,06	±0,03	
	pH eau	5	5,8	5,7	5,8	5,9	5,6	5,4	0,154
		±0,2	±0,3	±0,3	±0,1	±0,1	±0,3	±0,1	
	pH KCl	4,1	4,6	4,8	4,6	4,6	4,7	4,5	0,394
		±0,1	±0,1	±0,4	±0,1	±0,03	±0,2	±0,1	
	P (ppm)	123	143	106	87	88	398	73	0,578
		±59	±34	±27	±26	±4	±325	±15	
	K (ppm)	66 <sup>b</sup>	928 <sup>a</sup>	835 <sup>ac</sup>	376 <sup>bc</sup>	350 <sup>bc</sup>	168 <sup>b</sup>	60 <sup>b</sup>	<0,001*
		±15	±175	±112	±127	±85	±55	±12	
	Pbray	46	48	38	21	30	36	16	0,648
		±23	±16	±16	±10	±5	±15	±9	
	CEC	4,23	3,9	4,88	4,1	4,07	6	5,18	0,779
		±0,77	±0,34	±0,58	±0,30	±0,52	±2,44	±0,67	
	Ca (me/100g)	0,42	0,37	0,85	0,87	0,57	2,23	1,18	0,334
		±0,11	±0,07	±0,30	±0,16	±0,08	±1,45	±0,21	
	Mg (me/100g)	0,21	0,19	0,41	0,36	0,62	0,98	0,62	0,035*
		±0,04	±0,04	±0,10	±0,04	±0,04	±0,38	±0,09	
	K (me/100g)	0,14 <sup>b</sup>	1,86 <sup>ac</sup>	2,26 <sup>a</sup>	0,94 <sup>c</sup>	0,81 <sup>c</sup>	0,42 <sup>b</sup>	0,12 <sup>b</sup>	<0,001*
		±0,03	±0,28	±0,35	±0,35	±0,20	±0,15	±0,01	
	Na (me/100g)	0,06	0,05	0,2	0,05	0,04	0,05	0,05	0,448
		±0,01	±0,003	±0,15	±0,01	±0,02	±0,01	±0,01	
	Saturation	22,0 <sup>b</sup>	63,0 <sup>ab</sup>	78,7 <sup>a</sup>	56,3 <sup>ab</sup>	50,0 <sup>ab</sup>	58,0 <sup>ab</sup>	38,0 <sup>ab</sup>	0,025*
		±6,1	±2,5	±21,2	±7,7	±1,0	±10,1	±2,6	

### Annexe 7 : Composante biologique –Macrofaune

Valable pour l'ensemble des tableaux de l'annexe 7 (Composante biologique - Macrofaune) :

- *H* : horizon de sol (A0 et A1)
- : valeur de la statistique de test pour laquelle il existe des différences significatives entre les traitements avec le test non paramétrique de Kruskal Wallis suivi d'un test bilatéral.
- Les écartypes correspondent à l'erreur standard

**Tableau 15 : Biomasse et Abondance en macrofaune pour les horizons A0 et A1 en fonction du traitement**

H	Général	Traitements							Kruskal-Wallis
		conv	1	3	6	12	18	24	
A0	Abondance macrofaune (ind/m3)	2126,0 <sup>b</sup>	10831,7 <sup>a</sup>	15627,0 <sup>ac</sup>	9459,0 <sup>abc</sup>	4742,3 <sup>abc</sup>	4009,4 <sup>bc</sup>	9230,6 <sup>ac</sup>	<0,001*
		±644,8	±1147,3	±4230,3	±3415,7	±648,3	±927,4	±2152,1	
	Biomasse macrofaune (g/m3)	11,71	28,53	46	19,56	81,93	250,57	154,59	0,062
		±4,82	±6,45	±14,28	±7,55	±38,01	±139,21	±82,88	
A1	Abondance macrofaune (ind/m3)	150,7	60	170,7	210,7	64	94,7	77,3	0,429
		±97,3	±11,5	±54,7	±95,1	±17,1	±29,0	±13,8	
	Biomasse macrofaune (g/m3)	2,12	0,24	0,96	2,49	1,35	2,75	1,84	0,288
		±1,62	±0,08	±0,35	±1,86	±0,74	±1,13	±0,94	

**Tableau 16 : Abondance en macrofaune pour l'horizon A0 en fonction du traitement**

H Abondance (ind/m3)		Traitements							Kruskal Wallis
		conv	1	3	6	12	18	24	
A0	Formicidaee	1178	3837	7965	6013	2505	1074	1966	0,040*
		±688	±1114	±387	±3434	±833	±395	±1268	
	Dermaptera	129	518	143	328	320	217	1120	0,155
		±69	±165	±104	±294	±191	±184	±564	
	Coleoptera	297 <sup>b</sup>	3302 <sup>a</sup>	2525 <sup>a</sup>	1126 <sup>ab</sup>	163 <sup>b</sup>	390 <sup>b</sup>	1083 <sup>ab</sup>	< 0,001*
		±136	±932	±729	±389	±71	±155	±254	
	Blattoptera	0	33	456	205	36	0	137	0,031*
			±33	±219	±109	±36		±72	
	Isoptera	0	533	2568	0	100	0	0	< 0,001*
			±410	±1463		±72			
	Hemiptera	33	355	212	42	0	0	50	0,005*
		±33	±130	±115	±42			±50	
	Orthoptera	0	0	0	37	33	41	0	0,663
					±37	±33	±41		
	Diptera	0	306	212	107	0	0	148	0,018*
			±125	±106	±78			±78	
	Lepidoptera	0	0	0	0	33	33	0	0,536
						±33	±33		
	Araneideae	176	0	37	136	126	33	92	0,313
		±78		±37	±72	±96	±33	±63	
	Acarideae	0	0	0	37	0	0	0	0,423
					±37				
	Diplopoda	48 <sup>ab</sup>	0 <sup>b</sup>	0 <sup>b</sup>	750 <sup>ab</sup>	136 <sup>ab</sup>	156 <sup>ab</sup>	2696 <sup>a</sup>	< 0,001*
		±49			±328	±100	±156	±1307	
	Chilopoda	37	104	67	100	666	199	421	0,119
		±37	±73	±67	±72	±405	±73	±175	
	Lumbricina	227 <sup>ab</sup>	135 <sup>ab</sup>	0 <sup>b</sup>	164 <sup>ab</sup>	587 <sup>ab</sup>	1831 <sup>a</sup>	1398 <sup>ab</sup>	< 0,001*
		±118	±135		±113	±199	±852	±790	
	Mollusques	0	0	0	0	0	33	120	0,536
							±33	±120	
	Beetle larvae	0 <sup>c</sup>	1708 <sup>a</sup>	1440 <sup>ab</sup>	264 <sup>bc</sup>	36 <sup>c</sup>	0 <sup>c</sup>	0 <sup>c</sup>	< 0,001*
			±304	±468	±222	±36			
	Homoptera	0	0	0	148	0	0	0	0,423
					±148				

**Tableau 17 : Abondance en macrofaune pour l'horizon A1 en fonction du traitement**

H Abondance (ind/m3)		Traitements						Kruskal Wallis	
		conv	1	3	6	12	18		24
A1	Formicidae	87	27	119	145	32	27	11	0,071
		±63	±9	±53	±91	±10	±11	±7	
	Dermaptera	3	9	8	9	7	1	5	0,597
		±2	±4	±5	±7	±3	±1	±2	
	Coleoptera	9	11	12	5	8	8	16	0,836
		±3	±3	±6	±2	±5	±2	±8	
	Blattoptera	0	0	1	0	0	0	1	0,536
				±1				±1	
	Isoptera	0	1	9	24	1	0	0	0,010*
			±1	±4	±17	±1			
	Hemiptera	25	3	0	1	0	0	0	0,354
		±25	±2		±1				
	Orthoptera	0	0	0	3	0	0	0	0,059
					±2				
	Diptera	1	3	1	0	0	0	0	0,345
		±1	±2	±1					
	Lepidoptera	0	0	1	0	0	0	0	0,423
				±1					
	Araneidae	4	1	3	5	1	1	4	0,721
		±2	±1	±2	±3	±1	±1	±2	
	Acaridae	0	1	0	0	0	0	0	0,423
			±1						
	Diplopoda	0 <sup>ab</sup>	0 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	9 <sup>ab</sup>	0 <sup>ab</sup>	5 <sup>ab</sup>	12 <sup>b</sup>	0,020*
					±8		±3	±6	
	Chilopoda	3	1	5	3	8	4	3	0,893
		±2	±1	±5	±2	±5	±2	±2	
	Lumbricina	17 <sup>ab</sup>	0 <sup>ab</sup>	8 <sup>b</sup>	4 <sup>ab</sup>	7 <sup>ab</sup>	48 <sup>a</sup>	25 <sup>ab</sup>	0,029*
		±9		±3	±2	±4	±21	±10	
	Mollusques	0	0	0	0	0	0	0	NA
	Beetle larvae	1	3	3	1	0	0	0	0,42
		±1	±2	±2	±1				
	Homoptera	0	0	0	0	0	0	0	NA

Tableau 18 : Biomasse en macrofaune pour l'horizon A0 en fonction du traitement

H	Biomasse (g/m3)	Traitements							Kruskal-Wallis
		conv	1	3	6	12	18	24	
A0	Formicidaeae	0,392	5,04	10,177	3,15	1,284	0,493	0,652	0,003*
		±0,246	±2,113	±6,864	±1,519	±0,434	±0,164	±0,369	
	Dermaptera	0,466	5,832	1,092	2,366	3,112	3,617	3,578	0,283
		±0,346	±3,796	±0,991	±2,054	±1,861	±3,189	±1,557	
	Coleoptera	0,620 <sup>b</sup>	7,889 <sup>a</sup>	5,503 <sup>ab</sup>	2,757 <sup>ab</sup>	0,931 <sup>b</sup>	0,210 <sup>ab</sup>	1,006 <sup>ab</sup>	<0,001*
		±0,554	±2,834	±3,266	±2,328	±0,728	±0,173	±0,450	
	Blattoptera	0	0,003	1,492	0,873	0,004	0	15,05	0,037*
			±0,003	±0,968	±0,720	±0,004		±13,960	
	Isoptera	0	3,004	23,322	0	0,427	0	0	<0,001*
			±2,273	±13,662		±0,423			
	Hemiptera	0,127	0,222	0,052	0,004	0	0	0,005	0,005*
		±0,127	±0,116	±0,043	±0,004			±0,005	
	Orthoptera	0	0	0	7,6	0,05	0,623	0	0,663
					±7,600	±0,050	±0,623		
	Diptera	0	0,464	0,286	0,75	0	0	0,015	0,015*
			±0,226	±0,131	±0,711			±0,005	
	Lepidoptera	0	0	0	0	0,32	7,827	0	0,536
						±0,320	±7,827		
	Araneidaeae	1,111	0	0,004	0,018	0,098	0,087	1,051	0,308
		±0,889		±0,004	±0,011	±0,093	±0,087	±0,967	
	Acaridaeae	0	0	0	0,004	0	0	0	0,423
					±0,004				
	Diplopoda	0,014 <sup>ab</sup>	0 <sup>b</sup>	0 <sup>b</sup>	0,382 <sup>ab</sup>	29,556 <sup>ab</sup>	0,104 <sup>ab</sup>	0,813 <sup>a</sup>	<0,001*
		±0,014			±0,314	±29,514	±0,104	±0,385	
	Chilopoda	0,03	1,053	0,89	0,62	0,83	0,695	1,004	0,209
		±0,030	±0,710	±0,890	±0,616	±0,398	±0,417	±0,761	
	Lumbricina	8,955 <sup>ab</sup>	1,789 <sup>ab</sup>	0 <sup>b</sup>	0,387 <sup>ab</sup>	45,313 <sup>ab</sup>	83,363 <sup>a</sup>	131,237 <sup>ab</sup>	<0,001*
		±3,999	±1,789		±0,261	±28,989	±49,806	±78,564	
Mollusques	0	0	0	0	0	0,223	0,176	0,536	
						±0,223	±0,176		
Beetle larvae	0 <sup>c</sup>	3,233 <sup>a</sup>	3,180 <sup>ab</sup>	0,581 <sup>bc</sup>	0,004 <sup>c</sup>	0 <sup>c</sup>	0 <sup>c</sup>	<0,001*	
		±0,921	±1,614	±0,545	±0,004				
Homoptera	0	0	0	0,067	0	0	0	0,423	
				±0,067					

Tableau 19 : Biomasse en macrofaune pour l'horizon A1 en fonction du traitement

H	Biomasse (g/m3)	Traitements							Kruskal-
		conv	1	3	6	12	18	24	Wallis
A1	Formicidaeae	0,225	0,054	0,576	0,427	0,058	0,094	0,008	0,043*
		±0,217	±0,025	±0,378	±0,267	±0,036	±0,045	±0,007	
	Dermaptera	0,023	0,091	0,075	0,091	0,083	0,005	0,034	0,537
		±0,02	±0,047	±0,048	±0,074	±0,036	±0,005	±0,019	
	Coleoptera	0,005	0,029	0,05	0,002	0,053	0,013	0,028	0,721
		±0,003	±0,016	±0,031	±0,001	±0,041	±0,010	±0,025	
	Blattoptera	0	0	0,02	0	0	0	0,005	0,536
				±0,020				±0,005	
	Isoptera	0	0,014	0,072	0,197	0,001	0	0	0,010*
			±0,014	±0,033	±0,146	±0,001			
	Hemiptera	0,183	0,007	0	0	0	0	0	0,182
		±0,183	±0,005						
	Orthoptera	0	0	0	1,59	0	0	0	0,059
					±1,557				
	Diptera	0,029	0,003	0,005	0	0	0	0	0,663
		±0,029	±0,003	±0,005					
	Lepidoptera	0	0	0,044	0	0	0	0	0,423
				±0,044					
	Araneidaeae	0,04	0,004	0	0,092	0,01	0,025	0,217	0,585
		±0,037	±0,004		±0,087	±0,010	±0,025	±0,187	
	Acaridaeae	0	0	0	0	0	0	0	NA
Diplopoda	0	0	0	0,002	0	0,164	0,001	0,181	
				±0,002		±0,163	±0,000		
Chilopoda	0,032	0,033	0	0,011	0,017	0,041	0,001	0,655	
	±0,030	±0,033		±0,008	±0,013	±0,036	±0,001		
Lumbricina	1,578 <sup>ab</sup>	0 <sup>ab</sup>	0,111 <sup>b</sup>	0,080 <sup>ab</sup>	1,124 <sup>ab</sup>	2,407 <sup>a</sup>	1,550 <sup>ab</sup>	0,034*	
	±1,203		±0,051	±0,045	±0,748	±1,040	±0,924		
Mollusques	0	0	0	0	0	0	0	NA	
Beetle larvae	0,004	0	0,007	0	0	0	0	0,536	
	±0,004		±0,007						
Homoptera	0	0	0	0	0	0	0	NA	



**Tableau 20 : Abondance des différents groupes fonctionnels de macrofaune pour les horizons A0 et A1 en fonction du traitement**

H	Abondance (ind/m3)	Traitement							Kruskal- Wallis
		conv	1	3	6	12	18	24	
A0	Ingénieurs du sol	1405	4506	10534	6177	3192	2906	3363	0,057
		±679	±1030	±3850	±3420	±782	±832	±1333	
	Saprophages	474 <sup>bd</sup>	4160 <sup>a</sup>	3337 <sup>ac</sup>	2554 <sup>ad</sup>	656 <sup>b</sup>	763 <sup>bc</sup>	5184 <sup>a</sup>	<0,001*
		±211	±921	±824	±672	±324	±324	±1862	
	Phytophages	33 <sup>b</sup>	2062 <sup>a</sup>	1652 <sup>ac</sup>	491 <sup>ab</sup>	102 <sup>bc</sup>	108 <sup>bc</sup>	170 <sup>b</sup>	<0,001*
		±33	±369	±479	±255	±54	±57	±126	
	Prédateurs	214	104	103	236	792	233	513	0,243
		±96	±73	±73	±89	±404	±88	±183	
	Ingénieurs du sol	104	28	136	173	40	75	36	0,097
		±71	±9	±52	±91	±12	±28	±14	
A1	Saprophages	13	24	23	24	15	15	35	0,684
		±3	±6	±10	±11	±5	±3	±12	
	Phytophages	27	5	4	5	0	0	0	0,046*
		±25	±2	±2	±2				
	Prédateurs	7	3	8	8	9	5	7	0,936
		±2	±2	±5	±4	±5	±2	±3	

### Annexe 8 : Composante biologique - Nématofaune

Valable pour l'ensemble des tableaux de l'annexe 8 (Composante biologique - Nématofaune) :

- *H* : horizon de sol (A0 et A1)
- : valeur de la statistique de test pour laquelle il existe des différences significatives entre les traitements avec le test non paramétrique de Kruskal Wallis suivi d'un test bilatéral.
- Les écartypes correspondent à l'erreur standard

Tableau 21 : Nématodes totaux et libres pour les horizons A0 et A1 en fonction du traitement

H		Traitements							KW
		conv	1	3	6	12	18	24	
A1	Total	200,28	151,03	364,05	150,21	158,46	255,06	788,24	0,55
		±88,58	±15,61	±177,02	±68,68	±33,57	±92,75	±534,96	
	Libres	138,49	133,81	297,17	73,7	86,29	156,13	667,8	0,354
		±77,01	±11,55	±153,43	±20,04	±23,04	±70,84	±479,10	
A0	Total	397,16	245,93	720,11	307,63	1054,89	913,55	1068,42	0,059
		±272,20	±41,15	±276,66	±41,34	±526,73	±168,65	±198,92	
	Libres	254,14	201,63	642,02	189,63	685,89	614,41	789,6	0,08
		±177,72	±51,60	±286,76	±64,63	±360,24	±155,89	±122,86	

Tableau 22 : Abondance des familles de nématodes bactérivores et leur genre pour l'horizon A0 en fonction du traitement

H	Abondance famille nématodes	Groupes fonctionnels	Genre	Traitements							Kruskal - Wallis
				conv	1	3	6	12	18	24	
A0	Achromadoridae	Ba	1	2,3 ±2,3	0	0	0	4 ±4,0	0	0	0,51
	Alaimidae	Ba	1	1,6 ±1,6	0	0,6 ±0,6	4 ±4,0	34,1 ±25,2	23,9 ±4,8	29,2 ±11,9	0,06
	Bastianiidae	Ba	1	0	0	0	0	0	0	0	NA
	Cephalobidae	Ba	5	51,2 ±42,2	36,5 ±7,6	27,2 ±1,9	33,4 ±21,8	51,4 ±9,1	90,7 ±31,1	116,7 ±33,9	0,213
	Desmodoridae	Ba	1	0	0	0	0	0	1,8 ±1,8	20,3 ±17,1	0,12
	Diplogasteroididae	Ba	1	0 ±22,9	22,9 ±22,9	0	0	0	0	2,2 ±2,2	0,423
	Halaphanolaimidae	Ba	1	3,9 ±3,0	0	1,1 ±1,1	13,2 ±8,9	0	9,1 ±9,1	0	0,275
	Leptolaimidae	Ba	1	15,8 ±15,8	0	0	0	24,7 ±23,4	35,6 ±33,9	6,9 ±3,8	0,245
	Monhysteridae	Ba	1	2,3 ±2,3	0	0,6 ±0,6	9,8 ±8,9	0	5,4 ±5,4	4,3 ±4,3	0,605
	Neodiplogasteridae	Ba	1	0	0	8,9 ±8,9	0	0	0	2,2 ±2,2	0,51
	Odontolaimidae	Ba	1	4,5 ±4,5	0	0	0	0,9 ±0,9	0	0	0,51
	Ostellidae	Ba	1	10,6 ±5,3	0	0	9,3 ±9,3	0	5,3 ±5,3	7,9 ±4,5	0,339
	Panagrolaimidae	Ba	1	0 ±1,5	2,1 ±1,5	0	2,5 ±2,5	0	0	2,2 ±2,2	0,51
	Plectidae	Ba	2	1,1 ±1,1	0	0	4,1 ±1,7	0	7,2 ±3,6	10,5 ±6,8	0,157
	Prismatolaimidae	Ba	1	0	0	0	0,8 ±0,8	5,8 ±3,1	1,1 ±1,1	8,3 ±2,6	0,011*
	Rhabditidae	Ba	2	41,3 ±33,7	125 ±26,3	572,2 ±272,5	19,3 ±10,7	142,5 ±107,5	104,2 ±7,5	124,4 ±51,0	0,065
	Rhabdolaimidae	Ba	1	27 ±23,7	0	0	0	34,5 ±30,4	155,8 ±68,0	90,4 ±48,2	0,008*
	Teratocephalidae	Ba	1	0	0	0	0	0	1,1 ±1,1	19 ±9,6	0,12
	Tylopharyngidae	Ba	1	0	0	0	0	0,9 ±0,9	34,5 ±34,5	4,3 ±4,3	0,615
	<b>TOTAL</b>	<b>Ba</b>		<b>161,7 ±115,6</b>	<b>186,5 ±42,3</b>	<b>610,7 ±279,6</b>	<b>96,5 ±48,1</b>	<b>298,7 ±184,9</b>	<b>475,6 ±157,7</b>	<b>448,9 ±74,1</b>	<b>0,114</b>
		<b>Ba1</b>		<b>41,3 ±33,7</b>	<b>150 ±34,7</b>	<b>581,2 ±280,9</b>	<b>21,8 ±10,3</b>	<b>143,4 ±107,1</b>	<b>138,6 ±34,9</b>	<b>135,3 ±60,3</b>	<b>0,061</b>
		<b>Ba2-4</b>		<b>120,4 ±82,3</b>	<b>36,5 ±7,6</b>	<b>29,5 ±1,3</b>	<b>74,7 ±37,9</b>	<b>155,3 ±78,2</b>	<b>337 ±127,7</b>	<b>313,6 ±23,3</b>	<b>0,067</b>

Tableau 23 : Abondance des familles de nématodes fongivores et leur genre pour l'horizon A0 en fonction du traitement

H	Abondance famille nématodes	Groupes fonctionnels	Genre	Traitements							Kruskal - Wallis
				conv	1	3	6	12	18	24	
A0	Anguinidae-ditylenchus	Fu	1	0	0	0	1,5	0	7,1	2,2	0,459
						±0,7		±7,1	±2,2		
	Aphelenchidae	Fu	1	7,9	1,7	15,8	0	0	0	15,1	0,031*
				±3,4	±0,8	±8,1				±4,9	
	Aphelenchoididae	Fu	2	13,4	1,7	14,4	3,8	3,6	19,2	20,5	0,467
				±7,8	±1,7	±7,2	±2,2	±1,8	±17,6	±4,2	
	Belondiridae	Fu	3	20,4 <sup>ab</sup>	0,4 <sup>ab</sup>	0 <sup>b</sup>	10,0 <sup>ab</sup>	267,2 <sup>a</sup>	50,4 <sup>ab</sup>	130,7 <sup>ab</sup>	0,014*
				±13,8	±0,4		±5,3	±170,3	±29,4	±56,8	
	Diphtherophoridae	Fu	1	0	0	0	0	0	0	0	NA
	Leptonchidae	Fu	1	0,5	0	0	0	52,1	23,5	14,6	0,087
			±0,5				±30,3	±4,8	±7,4		
	TOTAL	Fu		42,3 <sup>ab</sup>	3,7 <sup>b</sup>	30,2 <sup>ab</sup>	15,2 <sup>ab</sup>	322,9 <sup>a</sup>	100,2 <sup>ab</sup>	183,1 <sup>ab</sup>	0,011*
				±22,9	±2,0	±8,4	±8,1	±142,6	±23,5	±55,9	

Tableau 24 : Abondance des familles de nématodes prédateurs et omnivores pour l'horizon A0 en fonction traitement

H	Abondance famille nématodes	Groupes fonctionnels	Genre	Traitements							Kruskal - Wallis
				conv	1	3	6	12	18	24	
A0	Anatonchidae	Pr	1	4,5	0	0	0	0	6,9	2,2	0,050*
			±1,5	±3,5					±2,2		
	Aporcelaimidae	pr	2	0	0	0,6	1,7	1,8	3,6	12,9	0,858
				±0,6					±1,7	±1,8	
	Ironidae	Pr	1	0	0	0	0	0	1,3	0,423	
				±1,3							
	Mononchidae	Pr	1	0,6	0	0	0,8	0	2,2	0,615	
			±0,6	±0,8					±2,2		
	Nygolaimidae	Pr	1	0	0	0	0	0	2,6	0,423	
				±2,6							
	Tripylidae	Pr	1	0	0,8	0,6	0	3,6	0	2,6	0,615
				±0,8						±0,6	
	TOTAL			5,0	0,8	1,1	2,5	5,4	10,5	23,8	0,189
				±0,9	±0,8	±1,1	±1,4	±5,4	±6,3	±15,5	
	Dorylaimidae	O	3	26,6	0	0	70,7	57,1	21,5	37,7	0,052
				±24,0						±18,6	
Nordiidae	O	1	1,6	0	0	0	0	0	0	0,423	
			±1,6								
Qudsianematidae	O	1	16,9	10,5	0	4,8	1,8	6,5	96,0	0,032*	
			±15,3						±10,0		±2,6
TOTAL			45,1	10,5	0	75,4	58,9	28,0	133,7	0,027*	
			±38,4	±10,0		±18,1	±36,2	±10,1	±73,8		
TOTAL Pr + O			50,2	11,4	1,1	77,9	64,3	38,5	157,5	0,029*	
			±39,2	±10,8	±1,1	±17,4	±34,4	±5,4	±87,5		

**Tableau 25 : Abondance des familles de nématodes phytophages (Obligatoire et Facultatif) et leur genre pour l'horizon A0 en fonction du traitement**

H	Abondance famille nématodes	Groupes fonctionnels	Genre	Traitements							Kruskal - Wallis
				conv	1	3	6	12	18	24	
A0	Cricematidae	PhO	1	0	0	0	0	0	0	0	NA
	Hemicycliophoridae	PhO	1	0	1,7	0	0	0	0	0	0,423
					1,7						
	Heteroderidae	PhO	1	0	0	0	0	0	1,8	0	0,423
									±1,8		
	Hoplolaimidae	PhO	1	34,4	14,2	8,2	0	0	5,4	5,2	0,194
				±33,6	14,2	±2,9			±3,1	±5,2	
	Longidoridae	PhO	1	0	0	0	0	0	0	4,1	0,423
										±4,1	
	Paratylenchidae	PhO	1	1,7	4,2	1,1	1,7	0	0	5,2	0,543
				±0,9	±2,2	±1,1	±1,7			±5,2	
	Pratylenchidae	PhO	1	0	0	0	0	0	0	0	NA
	Telotylenchidae	PhO	1	0	2,5	7,5	2,9	0	41,0	0	0,252
					±1,5	±7,5	±1,5		±38,3		
	Trichodoridae	PhO	1	0	0	0	0	0	0	0	NA
	TOTAL			36,1	22,6	16,8	4,6	0	48,1	14,4	0,365
				±32,8	±10,0	±6,5	±2,9		±42,8	±9,0	
	Tylenchidae	PhF	1	106,9	21,7	61,3	113,4	369,0	251	264,4	0,022*
				±61,7	±1,5	±30,7	±44,6	±167,8	±25,3	±89,9	
	TOTAL PhO + PhF			143	44,3	78,1	118,0	369,0	299,1	278,8	0,031*
				±94,5	±11,6	±26,9	±42,8	±167,8	±21,6	±85,7	

Tableau 26 : Abondance des familles de nématodes bactérivores et leur genre pour l'horizon A1 en fonction du traitement

H	Abondance famille nématodes	Groupes fonctionnels	Genre	Traitements						Kruskal-Wallis	
				conv	1	3	6	12	18		24
A1	Achromadoridae	Ba	1	0	0	0	1,1 ±1,1	0	0	0	0,423
	Alaimidae	Ba	1	5,0 ±2,5	1,0 ±1,0	0,7 ±0,4	0,5 ±0,5	0,5 ±0,5	3,0 ±1,5	9,2 ±4,2	0,102
	Bastianiidae	Ba	1	0	0	0	0	0	1,1 ±1,1	0	0,423
	Cephalobidae	Ba	5	20,3 ±12,4	73,9 ±15,5	79,8 ±28,1	3,5 ±0,4	20,8 ±2,0	19,9 ±12,7	48,4 ±6,5	0,041*
	Desmodoridae	Ba	1	0	0	0,5 ±0,5	0	0	0	9,3 ±8,4	0,132
	Diplogasteroididae	Ba	1	0	0	0,7 ±0,4	0	0	1,4 ±1,4	0	0,331
	Halaphanolaimidae	Ba	1	0,7 ±0,4	0	0,2 ±0,2	1,3 ±0,8	0,5 ±0,5	1,6 ±1,2	0	0,328
	Leptolaimidae	Ba	1	0,8 ±0,8	0	2,8 ±2,8	2,2 ±2,2	0	6,0 ±5,2	0	0,414
	Monhysteridae	Ba	1	0,4 ±0,4	0	0,5 ±0,5	0,7 ±0,4	0,5 ±0,5	0,3 ±0,3	0,6 ±0,6	0,849
	Neodiplogasteridae	Ba	1	0	0	0,5 ±0,5	0	0	1,4 ±1,4	0	0,51
	Odontolaimidae	Ba	1	0	0	0	0	0	1,4 ±1,4	2,9 ±2,9	0,51
	Ostellidae	Ba	1	0,8 ±0,8	0	0	0	1,0 ±1,0	4,7 ±3,6	5,3 ±5,3	0,445
	Panagrolaimidae	Ba	1	0,6 ±0,6	0	0	0	0	3,9 ±3,9	0	0,301
	Plectidae	Ba	2	2,3 ±0,8	1,3 ±0,8	0	0,2 ±0,2	2,3 ±0,5	0,6 ±0,6	1,1 ±0,6	0,050*
	Prismatolaimidae	Ba	1	1,9 ±1,4	0	1,0 ±1,0	7,1 ±2,5	0,5 ±0,5	3,3 ±2,5	12,6 ±3,3	0,033*
	Rhabditidae	Ba	2	34,6 ±27,7	49,6 ±13,2	166,7 ±102,5	19,8 ±6,9	33,1 ±15,6	31,3 ±19,0	448,7 ±439,4	0,378
	Rhabdolaimidae	Ba	1	4,5 ±2,3	0	0	0,7 ±0,5	0	3,0 ±3,0	22,8 ±11,4	0,044*
	Teratocephalidae	Ba	1	0	0	0	0	0	0	1,6 ±0,9	0,050*
	Tylopharyngidae	Ba	1	0	0	0	0	0	1,4 ±1,4	0	0,423
	TOTAL	Ba		71,8 ±41,6	125,8 ±8,8	253,6 ±131,7	37,2 ±7,3	59,2 ±19,0	84,1 ±45,5	562,5 ±460,9	0,141
		Ba1		35,2 ±27,4	49,6 ±13,2	168,0 ±102,1	19,8 ±6,9	33,1 ±15,6	39,3 ±21,7	448,7 ±439,4	0,388
		Ba2-4		36,6 ±14,2	76,2 ±13,8	85,6 ±29,6	17,4 ±2,6	26,0 ±3,4	44,8 ±23,9	113,8 ±30,8	0,075

**Tableau 27 : Abondance des familles de nématodes fongivores et leur genre pour l'horizon A1 en fonction du traitement**

H	Abondance famille nématodes	Groupes fonctionnels	Genre	Traitements						Kruskal-Wallis		
				conv	1	3	6	12	18		24	
A1	Anguinidae-ditylenchus	Fu	1	0,6	0,3	0	0,5	1,3	1,4	0	0,466	
				±0,6	±0,3		±0,5	±0,7	±1,4			
	Aphelenchidae	Fu	1	9,1	2,8	14,9	1,6	1,0	0,6	5,8	0,113	
				±6,8	±1,6	±7,4	±1,6	±1,0	±0,6	±2,2		
	Aphelenchoididae	Fu	2	1,4	1,8	3,8	0,7	1	5,6	3,8	0,888	
				±0,7	±1,0	±3,4	±0,4	±1,0	±4,8	±1,9		
	Belondiridae	Fu	3	32,8	2,4	14,0	12,4	17,8	40,5	72,2	0,066	
				±18,9	±1,6	±11,8	±11,1	±6,9	±18,2	±21,7		
	Diphtherophoridae	Fu	1	0	0	0	0	1,0	0	1	0,51	
								±1,0		±1,0		
	Leptonchidae	Fu	1	10,3	0,3	4,2	0	0,5	9,6	4,1	0,17	
				±9,8	±0,3	±4,2		±0,5	±5,6	±4,1		
	TOTAL				54,3	7,7	36,8	15,3	22,5	57,6	86,9	0,083
					±35,5	±2,8	±21,2	±12,9	±6,4	±25,0	±22,7	

**Tableau 28 : Abondance des familles de nématodes prédateurs et omnivores et leur genre pour l'horizon A1 en fonction du traitement**

H	Abondance famille nématodes	Groupes fonctionnels	Genre	Traitements						Kruskal-Wallis		
			conv	1	3	6	12	18	24			
A1	Anatonchidae	Pr	1	2,9	0	0	0	0	4,1	0	0,167	
				±1,7					±4,1			
	Aporcelaimidae	Pr	2	0,3	0	0,5	0	0	0	0,5	0,615	
				±0,3		±0,5				±0,5		
	Ironidae	Pr	1	0	0	0	0	0	0	0	NA	
	Mononchidae	Pr	1	0	0	1	0	0	0,8	0,5	0,615	
						±1,0			±0,8	±0,5		
	Nycolaimidae	Pr	1	0	0	0	0	0	0	0	NA	
	Tripylidae	Pr	1	0	0	0	1,4	0	0	0	0,51	
							±1,4					
	TOTAL Pr				3,2	0	1,5	1,4	0	4,9	1	0,592
					±1,7		±0,8	±1,4		±3,7	±1,0	
	Dorylaimidae	O	3	5,6	0	3	17,7	4,6	9,3	9,4	0,142	
				±2,6		±2,7	±7,3	±2,1	±3,8	±5,6		
	Nordiidae	O	1	0,9	0	0	0	0	0	0	0,423	
				±0,9								
	Qudsianematidae	O	1	2,7	0,3	2,2	2,2	0	0,3	8	0,289	
				±1,6	±0,3	±1,9	±2,2		±0,3	±4,7		
	TOTAL O				9,2	0,3	5,3	19,9	4,6	9,5	17,4	0,567
					±1,9	±0,3	±2,0	±7,5	±2,1	±3,6	±7,2	
	TOTAL Pr + O				12,4	0,3	6,8	21,3	4,6	14,4	18,4	0,328
					±0,3	±0,3	±1,2	±6,1	±2,1	±7,1	±6,2	

**Tableau 29 : Abondance des familles de nématodes phytophages (Obligatoire et Facultatif) et leur genre pour l'horizon A1 en fonction du traitement**

H	Abondance famille nématodes	Groupes fonctionnels	Genre	Traitements							Kruskal-Wallis
				conv	1	3	6	12	18	24	
A1	Criconeematidae	PhO	1	0	0,4 ±0,4	0	0	0	0	0	NA
	Hemicycliophoridae	PhO	1	0	0,4 ±0,4	0	0	0	0	0	0,423
	Heteroderidae	PhO	1	0	0	0	0	0	0	0	NA
	Hoplolaimidae	PhO	1	5,8 ±5,8	1,4 ±1,0	8,6 ±8,2	0	0	0	0	0,301
	Longidoridae	PhO	1	1,7 ±1,7	0	0	0	0	0	0	0,423
	Paratylenchidae	PhO	1	5,7 ±3,1	5,0 ±3,5	0,2 ±0,2	0,6 ±0,6	1,4 ±0,8	0,3 ±0,3	4,4 ±2,5	0,51
	Pratylenchidae	PhO	1	0	0,4 ±0,4	0	0	0	0	0	NA
	Telotylenchidae	PhO	1	2,5 ±2,5	1,0 ±1,0	6,8 ±4,8	12,5 ±6,4	0	14,9 ±11,0	0,5 ±0,5	0,409
	Trichodoridae	PhO	1	0,8 ±0,8	0	0	0	0	0	2,9 ±2,9	0,51
	<b>TOTAL PhO</b>			<b>16,5 ±4,4</b>	<b>8,4 ±4,5</b>	<b>15,6 ±8,5</b>	<b>13,1 ±5,8</b>	<b>1,4 ±0,8</b>	<b>15,1 ±11,3</b>	<b>7,8 ±5,1</b>	<b>0,491</b>
	Tylenchidae	PhF	1	45,3 ±8,3	8,8 ±1,2	51,3 ±19,5	63,4 ±46,8	70,8 ±11,7	83,8 ±32,9	112,6 ±53,4	0,493
	<b>TOTAL PhO + PhF</b>			<b>61,8 ±11,9</b>	<b>17,2 ±5,3</b>	<b>66,9 ±23,6</b>	<b>76,5 ±49,3</b>	<b>72,2 ±11,3</b>	<b>98,9 ±22,4</b>	<b>120,4 ±58,4</b>	<b>0,552</b>



*Annexe 9 : Litière et couverture du sol*

Tableau 30 : Biomasse des rafles et du couvert végétal en fonction du traitement

Biomasse	Traitements							ANOVA
	conv	1	3	6	12	18	24	
EFB (g/m <sup>2</sup> )	575,91 <sup>d</sup> ±79,57	8346,12 <sup>a</sup> ±850,70	7493,29 <sup>a</sup> ±993,22	5779,21 <sup>ab</sup> ±844,30	4138,03 <sup>bc</sup> ±371,58	3672,00 <sup>bc</sup> ±1015,48	1719,32 <sup>cd</sup> ±363,41	< 0,001*

Tableau 31 : Analyse des principaux éléments chimiques constituant l'EFB et le couvert végétal en fonction du traitement

Chimie EFB	Traitements							ANOVA
	conv	1	3	6	12	18	24	
pH	5,4 <sup>ab</sup>	9,0 <sup>a</sup>	5,7 <sup>ab</sup>	5,3 <sup>ab</sup>	5,4 <sup>ab</sup>	4,8 <sup>b</sup>	5,1 <sup>b</sup>	0,021*
Teneur en eau (%)	3,60	4,07	4,33	9,20	3,97	4,00	5,17	0,610
Azote total (%)	0,53	0,98	0,61	0,59	0,38	0,72	0,78	0,560
P2O5tot (%)	0,35	0,36	0,33	0,40	0,43	0,69	0,64	0,815
K2Otot (%)	0,15 <sup>ab</sup>	1,18 <sup>a</sup>	1,09 <sup>ab</sup>	0,32 <sup>ab</sup>	0,30 <sup>ab</sup>	0,06 <sup>b</sup>	0,08 <sup>ab</sup>	0,006*
MgOtot (%)	0,15	0,27	0,22	0,19	0,12	0,12	0,15	0,104
CaOtot (%)	0,56	0,58	0,64	0,80	0,81	1,20	1,16	0,661
Natot (%)	0,17	0,22	0,15	0,10	0,16	0,23	0,11	0,909
Corg (%)	18,40	23,60	23,97	30,07	16,84	23,57	26,80	0,686
CN	41,57	39,71	37,97	50,90	71,43	37,23	34,77	0,641
Cendres (%)	68,3	59,3	58,6	49,9	70,9	59,4	53,8	0,722

*Annexe 10 : Références bibliographiques en relation avec les apports de matière organique en palmeraies*

**Tableau 32 : Résultats des composantes physiques, chimiques et biologiques dans un système de culture palmier à huile avec fertilisation organique, tirés de la bibliographie**

Publication	Conditions d'expérimentation		Composante chimique					Physique		Biologique	
	Déroulement de l'expérimentation	Apport organique	pH	Corg (%)	Ntot (%)	Ca éch. (me/100g)	CEC (me/100g)	Teneur argile (%)	Densité apparente	Abond. macro. (ind/m <sup>3</sup> )	Abond. némato. (ind/100g)
<b>(Comte et al. 2013)</b>	Palmiers de 15 ans - Résultats sur 15cm	POME (750m <sup>3</sup> /ha/an) + EFB sous conditions réelles d'application	+ 0,55 (4,5)	+ 1,9 (4,2)	+ 0,12 (0,24)		+ 5 (11)				
<b>(Auriac 2012)</b>	Palmiers entre 23 et 27 ans - Résultats sur 15 cm après 3 et 27 mois	Rafles : 60 kg/m <sup>2</sup> /2ans appliquées sur l'interligne	(3mois)	(3mois)	(3mois)	(3mois) +	(3mois) +	(3mois)	(3mois)	(3mois)	
			+ 1,35 (6,39)	-0,23 (1,73)	+0 (0,11)	0,30 (0,91)	0,20 (4,61)	+ 0,66 (13,83)	+ 0,20 (1,55)	+286 (1335)	
			(27mois) +0,24 (5,28)	(27mois) + 0,15 (2,11)	(27mois) + 0,02 (0,13)	(27 mois) + 0,78 (1,39)	(27mois) + 1,57 (5,98)	(27mois) + 2 (15,17)	(27mois) + 0,02 (1,38)	(27mois) +409 (1458)	(27mois) + 37 (305)
<b>(Abu Bakar et al. 2011)</b>	Palmiers de 18 ans - Résultats après 10 ans sur 5cm - Rafles apportées depuis 12 mois	Rafles : 100 à 200 kg/m <sup>2</sup> /an appliquées en tas entre 4 palmiers (surface couverte = 6m <sup>2</sup> )	+ 1 à 2 unités pH (5,5 à 6,5)	+ 1 à 1,2 (2,5 à 2,7)	+ 0,025 à 0,095 (0,15 à 0,20)	+ 0,9 à 2,4 (1,4 à 2,9)	+ 3 à 5,5 (11 à 13,5)				
<b>(Kheong et al. 2010)</b>	Palmiers de 3 ans - Résultats à 3 mois sur 15cm	Rafles : 38 kg/m <sup>2</sup> /an appliqué sur un côté du palmier – étude du développement	+ 0,66 (4,80)	Pas de hausse (1,49)	Pas de hausse (0,18)	Pas de hausse (1,32)	Pas de hausse (6,85)				

Variabilité temporelle du biote des sols sous palmiers à huile

racinaire											
(Lim and Zaharah 2002)	Palmiers de 17ans - Résultats après 2ans sur 15cm	Rafles : 14kg/m²/an sur l'interligne	+ 0,8 (6,04)	+ 1,23 (2,88)	+ 0,19 (0,17)	+ 9,19 (14,09)					
Etude en cours	Palmiers entre 24 et 27ans - Résultats sur 5cm après 1, 3, 6, 12, 18 et 24 mois	Rafles : 60 kg/m² /2ans appliquées sur l'interligne	(1mois)								
			+ 2,1 (7,3)	+ 1,23 (2,18)	+ 0,08 (0,07)	+ 0,07 (0,15)	+ 3,73 (6,57)	+ 2,7 (7,7)	- 0,02 (1,21)	+ 8706 (10832)	- 151 (246)
			(3mois)								
			+ 2,2 (7,4)	+ 0,71 (1,66)	+ 0,06 (0,13)	+ 1,07 (1,89)	+ 3,42 (6,26)	+ 2,7 (7,7)	- 0,18 (1,05)	+ 13501 (15627)	+ 323 (720)
			(6mois)								
			+ 1,1 (6,3)	+ 0,6 (1,55)	+ 0,05 (0,12)	+ 1,10 (1,92)	+ 1,83 (4,67)	+ 1,7 (6,7)	- 0,14 (1,09)	+7333 (9459)	- 89 (308)
			(12mois)								
			+ 0,8 (6,0)	+ 0,92 (1,87)	+ 0,04 (0,11)	+ 1,27 (2,09)	+ 2,26 (5,1)	+ 2,7 (7,7)	- 0,29 (0,94)	+ 2616 (4742)	+ 658 (1055)
			(18mois)								
			+ 0,1 (5,1)	+ 1,2 (2,15)	+ 0,12 (0,19)	+ 3,11 (3,93)	+ 5,20 (8,04)	+ 3,7 (7,7)	- 0,35 (0,88)	+ 1883 (4009)	+ 516 (913)
(24mois)											
			+ 0,2 (5,2)	+ 2,13 (3,08)	+ 0,15 (0,22)	+ 2,67 (3,49)	+ 6,35 (9,19)	+ 8,3 (13,3)	- 0,62 (0,61)	+ 7105 (9231)	+ 671 (1068)

## Table des figures

Figure 1 : Schéma d'organisation des parcelles de la plantation (extrait de Auriac 2012) .....	12
Figure 2 : Zones de prélèvements des échantillons .....	13
Figure 3 : Densité apparente pour les horizons de sol A0 (a) et A1 (b) en fonction des différents traitements .....	18
Figure 4 : Stabilité des agrégats pour l'horizon de sol A0 en fonction du traitement .....	19
Figure 5 : Triangle des textures des blocs commerciaux échantillonnés pour les différents traitements, dans l'horizon A0 .....	19
Figure 6 : Teneur en argile des horizons de sol A0 (a) et A1 (b) en fonction du traitement .....	20
Figure 7 : Teneur en carbone organique pour l'horizon de sol A0 en fonction du traitement.....	21
Figure 8 : Teneur en azote total de l'horizon A0 en fonction du traitement.....	21
Figure 9 : pH de l'horizon A0 en fonction du traitement .....	22
Figure 10 : Teneurs en potassium total dans l'horizon A0 (Fig.10a) et A1 (Fig.10b) en fonction du traitement .....	22
Figure 11: Abondance de la macrofaune dans les horizons A0 (Fig.11a), A1 (Fig.11b), et sur l'ensemble A0+A1 (Fig.11c) en fonction du traitement .....	24
Figure 12 : Représentation de l'abondance des différents groupes taxonomiques de macrofaune pour l'horizon A0 en fonction des traitements .....	26
Figure 13 : ACP des abondances des groupes taxonomiques de macrofaune avec ellipses de confiance basées sur les traitements (Fig.13a) et cercle des corrélations fonction des axes 1 et 2 (Fig.13b).....	27
Figure 14 : Cercle des corrélations des groupes taxonomiques de macrofaune avec prise en compte des axes 3 et 4 .....	28
Figure 15 : Représentation des biomasses des différents groupes taxonomiques de macrofaune pour l'horizon A0 en fonction des traitements .....	29
Figure 16 : ACP des abondances des groupes fonctionnels de macrofaune avec ellipses de confiance basées sur les traitements (Fig.16a) et cercle des corrélations (Fig.16b).....	31
Figure 17 : Cercle des corrélations des groupes fonctionnels de macrofaune fonction des axes 3 et 4 .....	32
Figure 18 : Densité de nématodes pour les horizons A0 (Fig.18a) et A1 (Fig.18b) en fonction du traitement .....	32
Figure 19 : Densité des quatre groupes fonctionnels de nématodes en fonction du traitement .....	34

Figure 20 : ACP des abondances en groupes fonctionnels de nématofaune avec ellipses de confiance basées sur les traitements (a) et cercle des corrélations (b) .....	35
Figure 21 : Cercle des corrélations des groupes fonctionnels de nématodes fonction des axes 3 et 4	35
Figure 22 : Cercle des corrélations des groupes fonctionnels de macrofaune et de nématofaune.....	37
Figure 23 : AFM des groupes taxonomiques de macrofaune et des composantes physiques et chimiques .....	39
Figure 24 : AFM des groupes taxonomiques de macrofaune et des composantes physiques et chimiques par la prise en compte des 4 axes de l'AFM .....	40
Figure 25 : AFM des groupes fonctionnels de macrofaune et des composantes physiques et chimiques .....	40
Figure 26 : AFM des groupes fonctionnels de macrofaune et des composantes physiques et chimiques par la prise en compte de 4 axes de l'AFM. ....	41
Figure 27 : AFM des groupes fonctionnels de nématodes et des composantes physiques et chimiques .....	41
Figure 28 : Évolution de la biomasse de la litière en fonction du moment d'apport de l'EFB exprimée en biomasse de matière sèche par m <sup>2</sup> .....	42
Figure 29 : Indonésie, île de Sumatra, Province de Riau (sous Google earth) .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 30 : Coordonnées GPS du site d'expérimentation SMARTRI (sous Google earth) .....	53

## Table des tableaux

Tableau 1 : Composition des Groupes fonctionnels de macrofaune à partir des différents ordres et classes d'organismes du sol recueillis sous palmier à huile. Source : (Lavelle 1996; Ruiz et al. 2008)	16
Tableau 2 : Profondeur de l'horizon A0 (cm) dans le traitement conventionnel et en fonction du délai écoulé (mois) depuis l'application des rafles	18
Tableau 3 : Pourcentage des abondances de chaque groupe taxonomique par traitement (en %)	26
Tableau 4 : Richesse taxonomique (ou nombre de taxons) en fonction du traitement	30
Tableau 5 : Indices de Shannon pour les horizons A0 et A1 en fonction du traitement	30
Tableau 6 : Pourcentage des abondances de chaque groupe fonctionnel par traitement (en %)	30
Tableau 7 : Abondance en pourcentage des groupes fonctionnels de nématodes en fonction du traitement (en %)	33
Tableau 8 : Indices nématofauniques en fonction du traitement	36
Tableau 9 : Valeurs de l'indice CSQI pour chacun des traitements	38
Tableau 10 : Estimation qualitative de l'évolution des paramètres physiques, chimiques et biologiques par période comparé au traitement conventionnel. (*)Période 1 : 1 à 6 mois ; Période 2 : 12 à 18 mois ; Période 3 : 24 mois ; Uniquement l'horizon A0. Cette estimation est basée sur une appréciation positive ou négative du paramètre. Pour le biote, une augmentation des populations est jugée positive « a priori »	47
Tableau 11 : Détails du nombre d'échantillons en fonction des différentes analyses	56
Tableau 12 : Densité apparente et Stabilité des agrégats pour les horizons de sol A0 et A1 en fonction du traitement	58
Tableau 13 : Textures pour les horizons de sol A0 et A1 en fonction du traitement	58
Tableau 14 : Analyse des principaux éléments chimiques du sol pour les horizons de sol A0 et A1 en fonction du traitement	59
Tableau 15 : Biomasse et Abondance en macrofaune pour les horizons A0 et A1 en fonction du traitement	60
Tableau 16 : Abondance en macrofaune pour l'horizon A0 en fonction du traitement	61
Tableau 17 : Abondance en macrofaune pour l'horizon A1 en fonction du traitement	62
Tableau 18 : Biomasse en macrofaune pour l'horizon A0 en fonction du traitement	63
Tableau 19 : Biomasse en macrofaune pour l'horizon A1 en fonction du traitement	64
Tableau 20 : Abondance des différents groupes fonctionnels de macrofaune pour les horizons A0 et A1 en fonction du traitement	65

Tableau 21 : Nématodes totaux et libres pour les horizons A0 et A1 en fonction du traitement .....	66
Tableau 22 : Abondance des familles de nématodes bactérivores et leur genre pour l'horizon A0 en fonction du traitement .....	67
Tableau 23 : Abondance des familles de nématodes fongivores et leur genre pour l'horizon A0 en fonction du traitement .....	68
Tableau 24 : Abondance des familles de nématodes prédateurs et omnivores pour l'horizon A0 en fonction traitement .....	68
Tableau 25 : Abondance des familles de nématodes phytophages (Obligatoire et Facultatif) et leur genre pour l'horizon A0 en fonction du traitement .....	69
Tableau 26 : Abondance des familles de nématodes bactérivores et leur genre pour l'horizon A1 en fonction du traitement .....	70
Tableau 27 : Abondance des familles de nématodes fongivores et leur genre pour l'horizon A1 en fonction du traitement .....	71
Tableau 28 : Abondance des familles de nématodes prédateurs et omnivores et leur genre pour l'horizon A1 en fonction du traitement.....	71
Tableau 29 : Abondance des familles de nématodes phytophages (Obligatoire et Facultatif) et leur genre pour l'horizon A1 en fonction du traitement .....	72
Tableau 30 : Biomasse des rafles et du couvert végétal en fonction du traitement .....	73
Tableau 31 : Analyse des principaux éléments chimiques constituant l'EFB et le couvert végétal en fonction du traitement .....	73
Tableau 32 : Résultats des composantes physiques, chimiques et biologiques dans un système de culture palmier à huile avec fertilisation organique, tirés de la bibliographie .....	74

## Table des matières

1	Introduction .....	1
2	Cadre de l'étude .....	3
2.1	Lieu d'accueil .....	3
2.2	La stratégie de l'entreprise .....	4
2.3	La préoccupation de l'entreprise .....	5
3	Contexte et problématique .....	6
4	Matériel et Méthodes .....	12
4.1	Site d'expérimentation .....	12
4.2	Dispositif expérimental .....	13
4.3	Protocole de prélèvement des échantillons .....	13
4.3.1	Échantillonnage de la macrofaune du sol .....	14
4.3.2	Échantillonnage de la nématofaune du sol .....	14
4.3.3	Analyse des paramètres physiques du sol .....	14
4.3.4	Analyses des caractéristiques chimiques du sol et de la litière .....	14
4.4	Méthodes d'analyse des paramètres biologiques .....	15
4.4.1	Méthode d'analyse de la macrofaune .....	15
4.4.2	Méthode d'analyse de la nématofaune .....	16
4.5	Ressources statistiques et traitements statistiques .....	17
5	Résultats .....	18
5.1	Propriétés physiques du sol .....	18
5.1.1	Profondeur de l'horizon A0 .....	18
5.1.2	Densité apparente .....	18
5.1.3	Stabilité des agrégats .....	19
5.1.4	Texture .....	19
5.2	Propriétés chimiques du sol .....	21



5.2.1	Carbone organique .....	21
5.2.2	Azote total .....	21
5.2.3	pH.....	22
5.2.4	Potassium total .....	22
5.2.5	Autres paramètres chimiques .....	22
5.3	Propriétés biologiques du sol .....	24
5.3.1	La macrofaune .....	24
5.3.2	La nématofaune.....	32
5.3.3	Interactions macrofaune et nématofaune .....	37
5.4	Interactions entre les composantes physiques, chimiques et biologiques .....	38
5.4.1	Évaluation de la fertilité chimique .....	38
5.4.2	Les trois composantes du sol .....	39
5.5	La couverture du sol – cinétique de décomposition des rafles.....	42
5.5.1	Cinétique de décomposition des rafles .....	42
5.5.2	Évolution de la composition chimique de la couverture du sol .....	42
6	Discussion .....	43
7	Conclusion et perspectives.....	49
	Liste des sigles et abréviations.....	51
	Liste des annexes .....	52
	Table des figures .....	76
	Table des tableaux.....	78
	Table des matières.....	80
	Bibliographie.....	82

## Bibliographie

---

- Abu Bakar R, Darus SZ, Kulaseharan S, Jamaluddin N (2011) Effects of ten year application of empty fruit bunches in an oil palm plantation on soil chemical properties. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 89: 341-349
- Adeboye MKA, Bala A, Osunde AO, Uzoma AO, Odofin AJ, Lawal BA (2011) Assessment of soil quality using soil organic carbon and total nitrogen and microbial properties in tropical agroecosystem. *Agricultural sciences* 2: 34-40
- aeres (2010) Rapport de l'aeres sur l'unité : Performance des systèmes de culture des plantes pérennes (UPR 34). agence d'avaluation de la recherche et de l'enseignement supérieur, p 14
- AFNOR (1977) Aliments des animaux. Dosage des cendres brutes.
- Annabi M, Le Bissonnais Y, Le Villio-Poitrenaud M, Houot S (2011) Improvement of soil aggregate stability by repeated applications of organic amendments to a cultivated silty loam soil. *Agric. Ecosyst. Environ.* 144: 382-389
- Araujo R, Goedert WJ, Lacerda MPC (2007) Soil quality under different uses and native Cerrado. *Revista Brasileira De Ciencia Do Solo* 31: 1099-1108
- Asma IW, Rasidah KW, Rosenani AB, Aminuddin H, Rozita A (2011) Effects of mulching and fertilizer on nutrient dynamics of sand tailings grown with acacia hybrid seedlings. *Journal of Tropical Forest Science* 23: 440-452
- Auriac Q (2012) Variabilité spatiale des organismes des sols sous peuplement de palmier à huile; incidence des pratiques de fertilisation. Cirad-UR34. Cirad/UR34, Montpellier SupAgro-Irc et INP Toulouse/ENSAT, Montpellier, p 103
- Ayuke FO, Brussaard L, Vanlauwe B, Six J, Lelei DK, Kibunja CN, Pulleman MM (2011a) Soil fertility management: Impacts on soil macrofauna, soil aggregation and soil organic matter allocation. *Appl. Soil Ecol.* 48: 53-62
- Ayuke FO, Pulleman MM, Vanlauwe B, de Goede RGM, Six J, Csuzdi C, Brussaard L (2011b) Agricultural management affects earthworm and termite diversity across humid to semi-arid tropical zones. *Agric. Ecosyst. Environ.* 140: 148-154
- Barros E, Neves A, Blanchart E, Fernandes ECM, Wandelli E, Lavelle P (2003) Development of the soil macrofauna community under silvopastoral and agrosilvicultural systems in Amazonia. *Pedobiologia* 47: 273-280
- Bispo A, Gattin I, Hedde M, Bodin J, Villenave C, Peres G (2012a) Quels bioindicateurs pour la gestion durable des sols agricoles et forestiers ? In: ADEME (ed) Bioindicateurs pour la caractérisation des sols: journée technique nationale 16 octobre 2012. ADEME, Paris 7e, p 24p
- Bispo A, Gattin I, Hedde M, Bodin J, Villenave C, Peres G (2012b) Quels bioindicateurs pour la gestion durable des sols agricoles et forestiers ? . In: ADEME (ed) Bioindicateurs pour la caractérisation des sols, Paris
- Blanchart E (2012) Quels bioindicateurs pour une gestion durable des sols? In: éditions A (ed) Actes de la journée technique ADEME "bioindicateurs pour la caractérisation des sols", Paris
- Bongers T, Ferris H (1999) Nematode community structure as a bioindicator in environmental monitoring. *Trends in Ecology & Evolution* 14: 224-228
- Boyer J, Lavelle P (1998) Interactions biologiques (faune, ravageur, parasites, microflore) dans des sols sous cultures en milieu tropical humide (île de la Réunion). Université de Paris 06, Paris
- Caliman JP (2011) Oléagineux, Corps Gras, Lipides. SMARTRI, Pekanbaru, pp 123-131
- Caliman JP (2013), Libo, Indonésie
- Caliman JP, Daniel C, Taillez B (1994) La nutrition minérale du palmier à huile. *Oléagineux* 1: 36-48
- Caliman JP, Martha B, Saletes S (2001a) Dynamics of Nutrient Release from Empty Fruit Bunches in Field Conditions and Soil Characteristics Changes. *Proceedings of the 2001 PIPOC International Palm Oil Congress (Agriculture)*, p 7p
- Caliman JP, Martha B, Salètes S (2001b) Dynamics of nutrient Release from Empty Fruit Bunches in Field Conditions and Soil Characteristics Changes.

- Caron J, Kay BD, Stone JA (1992) IMPROVEMENT OF STRUCTURAL STABILITY OF A CLAY LOAM WITH DRYING. *Soil Science Society of America Journal* 56: 1583-1590
- Chapuis-Lardy L, Brauman A, Bernard L, Pablo AL, Toucet J, Mano MJ, Weber L, Brunet D, Razafimbelo T, Chotte JL, Blanchart E (2010) Effect of the endogeic earthworm *Pontoscolex corethrurus* on the microbial structure and activity related to CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O fluxes from a tropical soil (Madagascar). *Appl. Soil Ecol.* 45: 201-208
- Chaussod R (1996) La qualité biologique des sols: évaluation et implications. *Etude et gestion des sols* 3: 261-278
- Chenay (de La) E (2012) L'huile de palme, une des plus consommée au monde. *Le Figaro*
- Chiew YL, Shimada S (2013) Current state and environmental impact assessment for utilizing oil palm empty fruit bunches for fuel, fiber and fertilizer - A case of Malaysia. *Biomass and bioenergy* 51: 109-124
- CIRAD (2009) Performance des systèmes de culture des plantes pérennes.
- cirad (2013) Performance des systèmes de culture des plantes pérennes.
- Clarke KR, Ainsworth M (1993) A method of linking multivariate community structure to environmental variables. *Marine Ecology Progress Series* 92: 205-219
- Cluzeau D, Guernion M, Chaussod R, Martin-Laurent F, Villenave C, Cortet J, Ruiz-Camacho N, Pernin C, Mateille T, Philippot L, Bellido A, Rouge L, Arrouays D, Bispo A, Peres G (2012) Integration of biodiversity in soil quality monitoring: Baselines for microbial and soil fauna parameters for different land-use types. *Eur. J. Soil Biol.* 49: 63-72
- CNUCED (2012) Huile de palme. In: développement CdNUSlcel (ed)
- Comte I, Colin F, Grünberger O, Follain S, Whalen JK, Caliman JP (2013) Landscape-Scale assessment of soil response to long-term organic and mineral fertilizer application in an industrial oil palm plantation, Indonesia. *Agric. Ecosyst. Environ.* 169: 58-68
- Diacono M, Montemurro F (2010) Long-term effects of organic amendments on soil fertility. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 30: 401-422
- Eglin T, Blanchart E, Berthelin J, de Cara S, Grolleau G, Lavelle P, Richaume-Jolion A, Bardy M, Bispo A (eds) (2010) La vie cachée des sols. MEEDDM
- Eijkelkamp (2008) Operating Instructions : 08.13 Wet sieving apparatus. Eijkelkamp Agrisearch Equipment, Giesbeek, NL
- Feix I, Bispo A, Grand C, Galsomiers L (2012) Pourquoi un programme ADEME sur la bioindication des sols. In: ADEME (ed) Bioindicateurs pour la caractérisation des sols, Paris 7e
- fem (2012) Les activités en matière d'utilisation des terres, de changement d'affectation des terres et de foresterie (UTCATF). Fonds pour l'Environnement Mondial
- Ferrand M (1947) La culture du palmier à huile. *Oléagineux* 2: 1-10
- Ferris H, Bongers T, de Goede RGM (2001) A framework for soil food web diagnostics: extension of the nematode faunal analysis concept. *Appl. Soil Ecol.* 18: 13-29
- Gilot C, Lavelle P, Blanchart E, Keli JZ, Kouassi P, Guillaume G (1995) Biological activity of soil under rubber plantations in Côte d'Ivoire. *Acta Zool. Fennica* 196: 186-189
- Goulet F (2012) Radiographie critique de la notion d'intensification écologique et de son succès auprès d'une partie du monde agricole français. *Courrier de l'Environnement de l'INRA*: 1-13
- Grall J, Coïc N (2006) Synthèse des méthodes d'évaluation de la qualité du benthos en milieu côtier. Institut Universitaire Européen de la Mer - Université de Bretagne Occidentale - Laboratoire des sciences de l'Environnement MARin
- Greenpeace (2010) How Sinar Mas is pulping the planet.
- Gurmit S, Manoharan S, Kanapathy K (1981) Commercial scale bunch mulching of oil palm. *International Conference Kuala Lumpur: Oil palm in agriculture in the eighties report*, pp 367-377
- Hornus P (2009) La culture du palmier à huile - Généralités.
- Hornus P, Nguimjeu E (1992) Utilisation des rafles pour la fertilisation de plantation de palmiers à huile. *Oléagineux* 47: 245-249
- ird (2013) Climat.

- ITAB (2002) Activités biologiques et fertilité des sols. Intérêts et limites des méthodes analytiques disponibles. ITAB, Paris
- Jeffery S, Gardi C, Jones A, Montanarella L, Marmo L, Miko L, Ritz K, Peres J, Römbke J, Putten WHvd (2010) European atlas of soil biodiversity. European Commission, Publications Office of the European Union Luxembourg
- Jimenez JJ, Decaens T, Amezquita E, Rao I, Thomas RJ, Lavelle P (2011) Short-range spatial variability of soil physico-chemical variables related to earthworm clustering in a neotropical gallery forest. *Soil Biol. Biochem.* 43: 1071-1080
- Karlen DL, Andrew SS, Doran JW (2001) Soil quality: current concepts and applications. *Adv. Agron* 74: 1-40
- Kheong LV, Rahman ZA, Musa MH, Hussein A (2010) Empty fruit bunch application and oil palm root proliferation. *Journal of Oil Palm Research* 22: 750-757
- Lavelle P (1996) Diversity of soil fauna and ecosystem function. *Biology international* 33: 3-15
- Lavelle P, Barois I, Blanchart E, Brown G, Brussaard L, Decaens T, Fragoso C, Jimenez JJ, Kajondo KK, Martinez MD, Moreno A, Pashanasi B, Senapati B, Villenave C (1998) Earthworms as a resource in tropical agroecosystems. *Nature & Resources* 34: 26-41
- Lavelle P, Barros E, Blanchart E, Brown G, Desjardins T, Mariani L, Rossi JP (2001) SOM management in the tropics: Why feeding the soil macrofauna? *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 61: 53-61
- Lim KC, Chan KW (1989) Towards optimizing empty fruit bunch application in oil palm. In: aalani S, Zin Zawawi Z, Paranjothy K, Ariffin D, Rajanaidu N, Cheah S (eds) 1989 PORIM International Palm Oil Development Conference - Module II - Agriculture, pp 235-242
- Lim KC, Zaharah AR (2000) Decomposition and N & K release by oil palm empty fruit bunches applied under mature palms. *Journal of Oil Palm Research* 12: 55-62
- Lim KC, Zaharah AR (2002) The effects oil palm empty fruit bunches on oil palm nutrition and yield and soil chemical properties. *Journal of Oil Palm Research* 14: 1-9
- Marsden C (2013) Introduction à l'écologie du sol : Vers l'intensification écologique des agro-écosystèmes. In: eco&sol (ed) Formation écologie du sol
- Mathieu J (2004) Etude de la macrofaune du sol dans une zone de déforestation en Amazonie du Sud Est, au Brésil, dans le contexte de l'agriculture familiale. Université Pierre et Marie Curie, Paris, p 237
- Rossi JP, Blanchart E (2005) Seasonal and land-use induced variations of soil macrofauna composition in the Western Ghats, southern India. *Soil Biol. Bioche.* 37: 1093-1104
- Ruiz N, Lavelle P, Jimenez JJ (2008) Soil macrofauna field manual - Technical level. In: Ird (ed). FAO, Rome, p 113
- Ruiz N, Mathieu J, Célini L, Rollard C, Hommay G, Iorio E, Lavelle P (2011) IBQS: A synthetic index of soil quality based on soil macro-invertebrate communities. *Soil Biology & Biochemistry* 43: 2032-2045
- Rutgers M, Schouten AJ, Bloem J, van Eekeren N, de Goede RGM, Akkerhuis G, van der Wal A, Mulder C, Brussaard L, Breure AM (2009) Biological measurements in a nationwide soil monitoring network. *Eur. J. Soil Sci.* 60: 820-832
- Saletes S, Siregar FA, Caliman JP, Liwang T (2004) Ligno-cellulose composting: Case study on monitoring oil palm residuals. *Compost Science & Utilization* 12: 372-382
- Sanchez-Moreno S, Ferris H, Young-Mathews A, Culman SW, Jackson LE (2011) Abundance, diversity and connectance of soil food web channels along environmental gradients in an agricultural landscape. *Soil Biol. Biochem.* 43: 2374-2383
- Schvartz C, Muller J-C, Decroux J (2005) Guide de la Fertilisation Raisonnée, Paris
- Sharma KL, Grace JK, Mandal UK, Gajbhiye PN, Srinivas K, Korwar GR, Bindu VH, Ramesh V, Ramachandran K, Yadav SK (2008) Evaluation of long-term soil management practices using key indicators and soil quality indices in a semi-arid tropical Alfisol. *Australian Journal of Soil Research* 46: 368-377
- Sharma KL, Raju KR, Das SK, Rao B, Kulkarni BS, Srinivas K, Grace JK, Madhavi M, Gajbhiye PN (2009) Soil Fertility and Quality Assessment under Tree-, Crop-, and Pasture-Based Land-Use Systems in a Rainfed Environment. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 40: 1436-1461
- Singh G, Kow DL, Lee KH, Lim KC, Loong SG (1999) Empty fruit bunches as mulch. In: Malaysian palm oil growers' council KL (ed) Oil palm and the environment - a Malaysian perspective, Kuala Lumpur, pp 171-183

Smart P (2012) smart agribusiness and food About us.

Tabarant P, villenave C, Risede JM, Roger-Estrade J, Thuries L, Dorel M (2011) Effects of four amendments on banana parasitic nematodes and soil nematode communities. *Appl. Soil Ecol.* 49: pages 59-67

Tondoh JE, Kone AW, N'Dri JK, Tamene L, Brunet D (2013) Changes in soil quality after subsequent establishment of *Chromolaena odorata* fallows in humid savannahs, Ivory Coast. *Catena* 101: 99-107

USDA (2012) Palm Oil: World Supply and Distribution. In: Agriculture USDo (ed) Foreign Agricultural Service, p 06

Velasquez E, Lavelle P, Andrade M (2007) GISQ, a multifunctional indicator of soil quality. *Soil Biology & Biochemistry* 39: 3066-3080

villenave C (2013) Les nématodes du sol, Bio-indicateurs permettant de caractériser l'état du sol et son fonctionnement biologique. ELISOL Environnement, Montpellier

Villenave C, Saj S, Pablo AL, Sall S, Djigal D, Chotte JL, Bonzi M (2010) Influence of long-term organic and mineral fertilization on soil nematofauna when growing *Sorghum bicolor* in Burkina Faso. *Biology and Fertility of Soils* 46: 659-670

WWF (2011) HUILE DE PALME de la déforestation à la nécessaire durabilité. WWF, Paris, p 38

Yoro G, Godo G (1990) Les méthodes de mesure de la densité apparente - Analyse de la dispersion des résultats dans un horizon donné. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.* vol. XXV. n°4: 423-429